Corso di Laurea in Economia e Gestione Aziendale

IL CONTRIBUTO DELL'ENERGIA NUCLEARE ALLA GENERAZIONE ELETTRICA NEI PRINCIPALI PAESI UTILIZZATORI: EVOLUZIONE STORICA E PROSPETTIVE FUTURE

Relatore
Prof.ssa Paola Masotti

Laureando
Federico Ianeselli

Anno Accademico 2012/2013

SOMMARIO

INTRODUZIONE

Il presente elaborato si prefigge l'obiettivo di esporre gli aspetti più significativi che caratterizzano l'industria del nucleare. L'approccio utilizzato si articola nell'analisi storica dello sfruttamento, a fini civili, della potenza dell'atomo, ripercorrendo le tappe fondamentali delle varie industrie nucleari dei paesi che attualmente ne sono più coinvolti, partendo dagli albori fino agli sviluppi degli ultimi anni, ed accennando anche alle prospettive future, sia in termini di progetti a breve che a medio-lungo termine. Ciò ha permesso di evidenziare le motivazioni che hanno spinto i diversi stati nazionali a dotarsi di impianti di produzione elettronucleare, le peculiarità nella crescita di questa tecnologia, ma anche i rapporti e gli scambi che tra questi stati sono intercorsi o che intercorrono tuttora. Nonostante la ricerca sul nucleare si stia rivolgendo anche a forme come quella della fusione, si è deciso di limitare l'analisi al processo di fissione, essendo esso attualmente, quello ancora commercialmente preponderante.

L'analisi "per paese", permette, oltre a descrivere l'evoluzione storica, anche di evidenziare le criticità nelle diverse politiche energetiche, e quindi come si stia, o meno, cercando di affrontarle. Proprio in tema di strategie energetiche, l'analisi non si è limitata ad una trattazione monografica dei soli temi legati direttamente od indirettamente agli impianti nucleari, ma si è dedicata anche a presentare il contesto in cui questa fonte contribuisce alla generazione elettrica, accanto alle altre fonti fossili convenzionali e rinnovabili. In questa ottica, si ritroveranno altresì considerazioni relative alle condizioni delle diverse infrastrutture di distribuzione elettriche nazionali, ma anche sulle prospettive future legate all'aumento della popolazione mondiale ed alla prevedibile conseguenza che ciò porterà ad un aumento del consumo di elettricità. Alcuni stati, che si definiscono in via di sviluppo, ma nei quali questo sviluppo, seppur inficiato dalla congiuntura economica internazionale sfavorevole e da una crescente richiesta di maggiori diritti da parte dei cittadini, procede ancora a ritmi sostenuti, si trovano, e ancor di più si troveranno nel futuro, anche relativamente breve, a dover fare i conti con nuove sfide energetiche, che dovranno essere necessariamente affrontate, ed in questo, il nucleare giocherà un ruolo di primo piano. L'aumento così accelerato, almeno per gli standard dei paesi industrializzati, del pil, ha portato però con se anche fattori, negativi, come l'inquinamento che si registra in alcuni paesi asiatici. In merito a ciò, ed in particolare riguardo al caso cinese, si sono voluti approfondire anche gli impatti di questo inquinamento, fornendo anche dati utili a quantificarlo.

Va sottolineato come la tecnologia nucleare sia molto complessa e una sua semplificazione eccessiva potrebbe far nascere incomprensioni nel lettore e portarlo a non comprendere correttamente le informazioni ed i dati riportati. Al fine di evitare questi rischi, si è deciso, pur

sforzandosi di esporre nella maniera più comprensibile possibile, di arricchire il presente testo con parti di approfondimento, al fine di spiegare i concetti chiave, e non costringere il lettore a reperire questi concetti da altre fonti. Ciò, in particolare nella prima parte, ha spinto a dedicare un contenuto numero di pagine all'esposizione delle basi fisiche della fissione, e su come questo fenomeno sia stato sfruttato dal punto di vista ingegneristico per la produzione di energia, cosa che ha permesso di realizzare le varie filiere di reattori esistenti. Più avanti, dopo la metà del testo, si avrà anche modo di ottenere un rapido colpo d'occhio su ciò che si sta affacciando all'orizzonte nel campo della ricerca che, in parte, anche se ancora non ci è dato sapere in che percentuale, confluirà nella cosiddetta *quarta generazione* di reattori, anche se sin d'ora traspare una concezione innovativa allo sfruttamento del fenomeno della fissione, e nuove strade per rendere gli impianti più sicuri, efficienti e con impatti ambientali ridotti.

Si è voluto inoltre andare ad analizzare un aspetto che spesso viene trascurato o comunque lasciato a margine, ossia l'atteggiamento dei cittadini nei confronti del nucleare nel proprio paese. A questo scopo ci si è affidati a varie interviste condotte nell'arco degli ultimi anni, da parte di diversi organismi. A seconda del paese risultavano disponibili un numero di dati più o meno esteso, ma comunque, nella maggior parte dei casi, si è riusciti ad analizzare uno spettro ampio di tematiche, non solo il semplice tasso di favore nei confronti dello sfruttamento dell'energia dell'atomo. La scelta di far rientrare anche l'atteggiamento dei cittadini nell'analisi, è sembrato un dato rilevante per valutare le prospettive di sviluppo futuro della fonte nucleare, anche alla luce delle ricadute economiche e sociali derivanti dalla costruzione di nuovi impianti.

Si è deciso di dedicare infine una parte consistente al tema del decommissioning. Le criticità legate a questo processo infatti, sono da qualche decennio uno dei temi più dibattuti, anche in paesi come l'Italia che hanno rinunciato a sviluppare un industria nucleare sul proprio territorio, ma che devono gestire l'eredità lasciata dagli impianti costruiti prima del 1987. Come si vedrà, il decommissioning è portato avanti con linee guida diverse, a seconda del paese e delle diverse legislazioni, e ne consegue che anche la gestione dei rifiuti da esso derivante presenti delle differenze.

SCALE DI GRANDEZZA

La trattazione del tema della produzione di energia nucleotermoelettrica porta, nella maggior parte dei dibattiti pubblici, ad indirizzarsi in breve su di una serie di elementi che, seppur certamente e comprensibilmente rilevanti dal punto di vista sociale ed economico, non permettono di avere una visione di insieme della materia. E' doveroso altresì sottolineare come ad un cittadino a ragione interessi, sia dal punto di vista psicologico, sia anche relativamente ad aspetti concreti, il tema della sicurezza, quindi della collocazione sul territorio più idonea degli impianti, della loro operatività minimizzando i rischi, nonché della gestione dei rigetti ed effluvi che necessariamente si generano. Posto che tutti i punti appena citati e le relative preoccupazioni collegate sono perfettamente legittime, è ora da comprendere il perché dello sviluppo della tecnologia nucleare nonostante tutti questi fattori.

Per sviluppare questo tema è opportuno prendere il via introducendo il concetto di densità energetica, ossia della quantità di energia per unità di massa.

TABELLA 1. DENSITÀ ENERGETICA DI ALCUNE FONTE FOSSILI

Fonte	Densità di energia per massa (MJ/Kg)
Uranio Naturale	570.000,00
Petrolio	45,0
Gas Naturale	53,6
Carbone (Coke)	28,0

Fonte: elaborazione dell'autore da dati: Natural Gas, *About Natural Gas: Reference Guides*, <http://www.natural-gas.com.au/about/references.html>, 2007; e Clean Energy Insight, *How Far Will Energy Go?: An Energy Density Comparison*, <http://www.cleanenergyinsight.org/interesting/how-far-will-your-energy-go-an-energy-density-comparison/>, 12 ottobre 2009

Quello che si può ricavare dai dati presenti in ***Tabella 1***, è come l'uranio utilizzato in una centrale atomica, sia un combustibile che racchiude in se un potenziale energetico grandemente superiore alle altre fonti fossili convenzionali attualmente utilizzate. Ciò significa in sintesi che molta energia può essere ricavata da una quantità molto piccola di materiale.

Nell'esempio, è riportata la densità energetica dell'uranio naturale in un'installazione ad acqua naturale (LWR), ma i valori sono anche superiori, considerando uranio arricchito a diverse percentuali all'interno di altre soluzioni tecnologiche. Sono stati appena utilizzati per necessità dei termini come: uranio naturale ed arricchito; il significato e gli elementi del processo verranno esposti poco più avanti.

Per rigore scientifico è doveroso sottolineare come l'efficienza di un reattore si aggiri attorno al 30-35%, ciò significa che una parte rilevante dell'energia termica prodotta dalla reazione di fissione viene dispersa, non rendendosi disponibile come energia elettrica, ma è anche vero che si registra una dispersione in tutte le trasformazioni da una forma di energia an un'altra, non solo negli impianti di produzione nucleotermoelettrica.

Guardando ai numeri, è quindi comprensibile come l'interesse per questa fonte si sia sviluppato, considerando che una così alta densità energetica comporta vantaggi non solo dal punto di vista delle capacità energetiche, ma anche altre, come le ridotte quantità da movimentare verso gli impianti per il loro funzionamento. E' facile intuire infatti, che alimentare a carbone una centrale convenzionale da 1GWe richieda annualmente uno sforzo in termini di numero di trasporti ferroviari di molto superiore rispetto a quelli necessari per una di tipo atomico.

Sul fronte degli impianti nucleari vi sono da considerare altri vantaggi rispetto alle fonti fossili convenzionali, come le praticamente nulle emissioni di gas serra nel momento della produzione elettrica, ma esistono punti a suo favore anche di tipo geopolitico, per esempio considerando che le principali riserve di uranio sono localizzate in paesi politicamente stabili.

Storicamente poi, il grande interesse nell'energia atomica, soprattutto all'inizio di questa esperienza, risiedeva nell'opportunità di produzione di armi tattiche e strategie notevolmente più potenti di quelle fino a quel momento a disposizione, cosa che permise l' iniezione di una grande quantità di capitali, mezzi e uomini che avrebbe successivamente dato la spinta anche agli studi sulla declinazione civile del nucleare, fondati sulla possibilità di sfruttare un'energia a bassissimo costo, e che porterà alla nasciata ed allo sviluppo dell'industria nucleare così come oggi noi la conosciamo.

LA PRODUZIONE DI URANIO

Il combustibile maggiormente utilizzato nelle odierne centrali deriva dalla lavorazione di rocce contenenti uranio.

Le riserve di minerale di uranio che, una volta processarlo, diventerà combustibile nucleare, sono localizzate in numerosi paesi, anche se i giacimenti nazionali presentano anche notevoli differenze in termine di estensione.

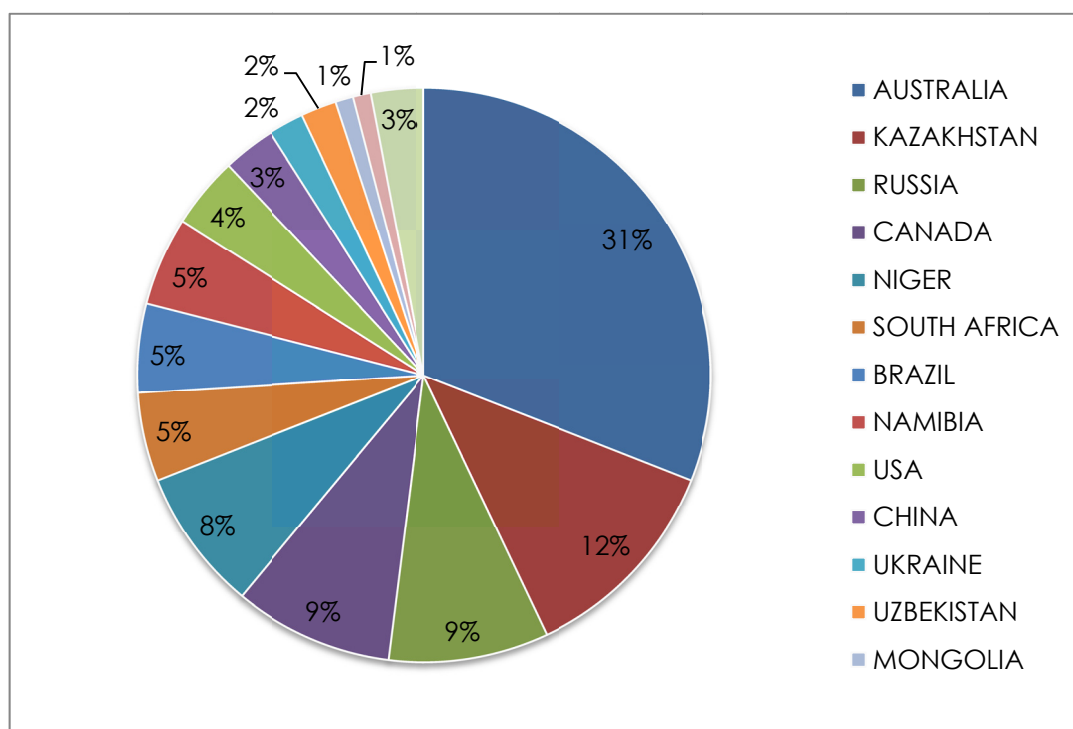
GRAFICO 1. RISERVE RECUPERABILI CONOSCIUTE, A COSTI <USD 130/KG U (AGGIORNATO AL 1° GENNAIO 2011)

Fonte: Organisation of Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency & International Atomic Energy Agency, *Uranium 2011: Resources, Production and Demand* ("Red Book"), Parigi, OECD, 2012, 18

FIGURA 1. MAPPA DELLA DISTRIBUZIONE GLOBALE DELLE RISERVE DI URANIO, RECUPERABILI A COSTI <USD 130/KG U

Fonte: Organisation of Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency & International Atomic Energy Agency, *Uranium 2011: Resources, Production and Demand* ("Red Book"), Parigi, OECD, 2012, 17

I dati si riferiscono alle riserve ragionevolmente certe (reasonably assured resources), ossia ai giacimenti di minerale per cui si conosce l'entità, la conformazione e le caratteristiche di concentrazione di prodotto, ossia quanto di quest'ultimo è possibile ricavare, da una data quantità di rocce estratte, con la tecnologia disponibile ed entro determinati intervalli di costo; sommate alle riserve dedotte (*inferred*), ossia ai giacimenti scoperti ma la cui quantità e qualità è stata solo stimata attraverso prospezioni geologiche[1].

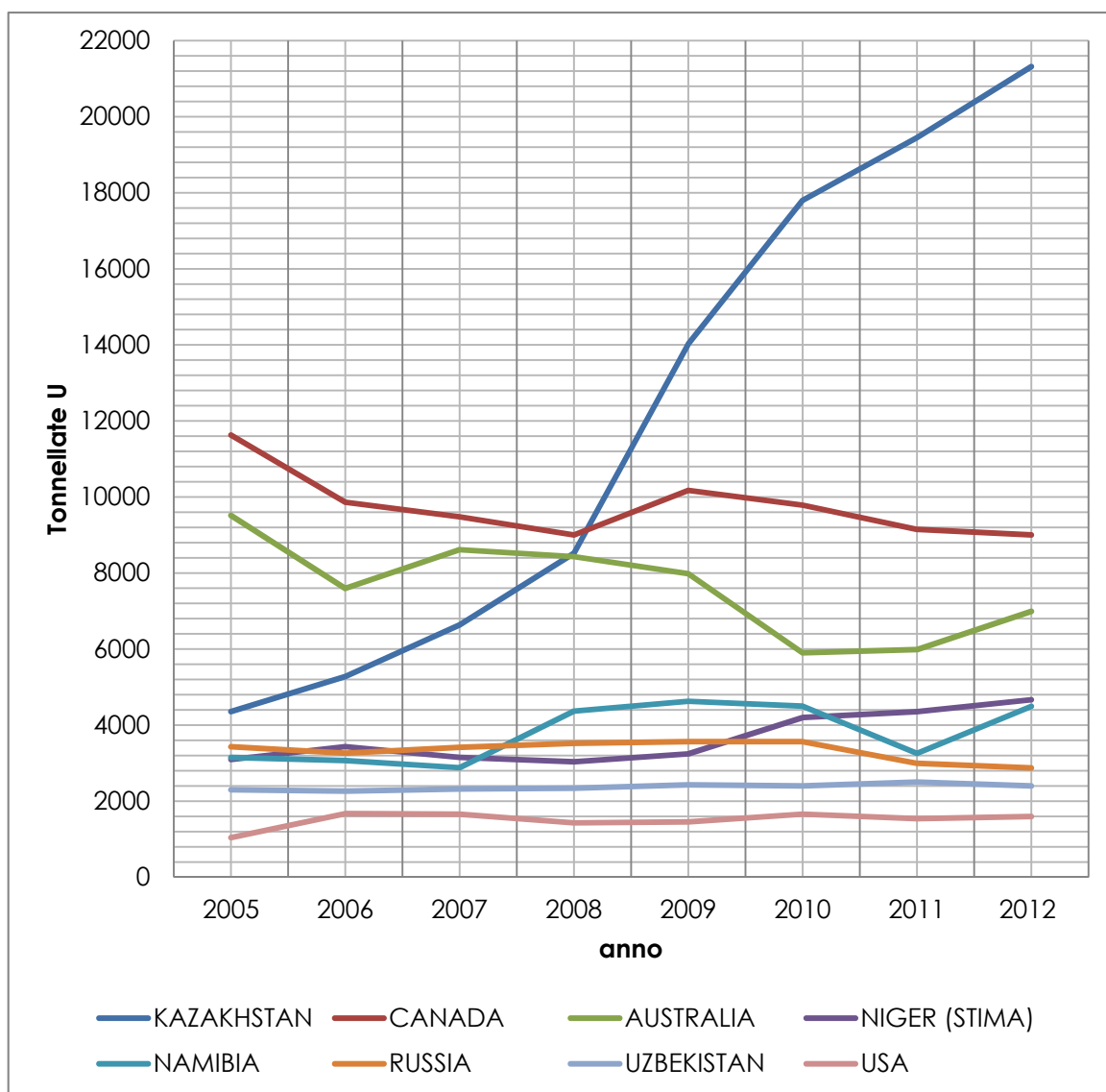
TABELLA 2. PRODUZIONE ANNUA DI URANIO PER PAESE (IN TONNELLATE)

Paese	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
KAZAKHSTAN	4.357	5.279	6.637	8.521	14.020	17.803	19.451	21.317
CANADA	11.628	9.862	9.476	9.000	10.173	9.783	9.145	8.999
AUSTRALIA	9.516	7.593	8.611	8.430	7.982	5.900	5.983	6.991
NIGER (STIMA)	3.093	3.434	3.153	3.032	3.243	4.198	4.351	4.667
NAMIBIA	3.147	3.067	2.879	4.366	4.626	4.496	3.258	4.495
RUSSIA	3.431	3.262	3.413	3.521	3.564	3.562	2.993	2.872
UZBEKISTAN	2.300	2.260	2.320	2.338	2.429	2.400	2.500	2.400
USA	1.039	1.672	1.654	1.430	1.453	1.660	1.537	1.596
CHINA (STIMA)	750	750	712	769	750	827	885	1.500
MALAWI					104	670	846	1.101
UKRAINE (STIMA)	800	800	846	800	840	850	890	960
SOUTH AFRICA	674	534	539	655	563	583	582	465
INDIA (STIMA)	230	177	270	271	290	400	400	385
BRAZIL	110	190	299	330	345	148	265	231
CZECH REP.	408	359	306	263	258	254	229	228
ROMANIA (STIMA)	90	90	77	77	75	77	77	90
GERMANY	94	65	41	0	0	8	51	50
PAKISTAN (STIMA)	45	45	45	45	50	45	45	45
FRANCE	7	5	4	5	8	7	6	3
TOTAL	**41 719**	**39 444**	**41 282**	**43 764**	**50 772**	**53 671**	**53 493**	**58 394**

Fonte: World Nuclear Association, *World Uranium Mining Production*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/World-Uranium-Mining-Production/>, aggiornato Luglio 2013.

L'Australia risulta il paese con le riserve di minerale di più rilevante entità, soprattutto se le si comparano con quelle del secondo paese in lista, ossia il Kazakhstan. E' però interessante notare come la classifica cambi se si considerano invece i dati 2012, relativi alla produzione. In questo caso, la produzione dell'ex paese sovietico appena citato, presenta una costante e sostenuta crescita fin dal 2005, mentre si nota come i paesi che, fino a qualche anno fa risultavano leader nel campo, rimangono su output pressoché costanti, se non in contrazione.

[1] National Wetlands Research Center U.S.G.S., *Mineral Reserves, Resources, Resource potential and certainity*, <http://www.nwrc.usgs.gov/techrpt/sta13.pdf>, s.d., ultima consultazione 02/01/2014

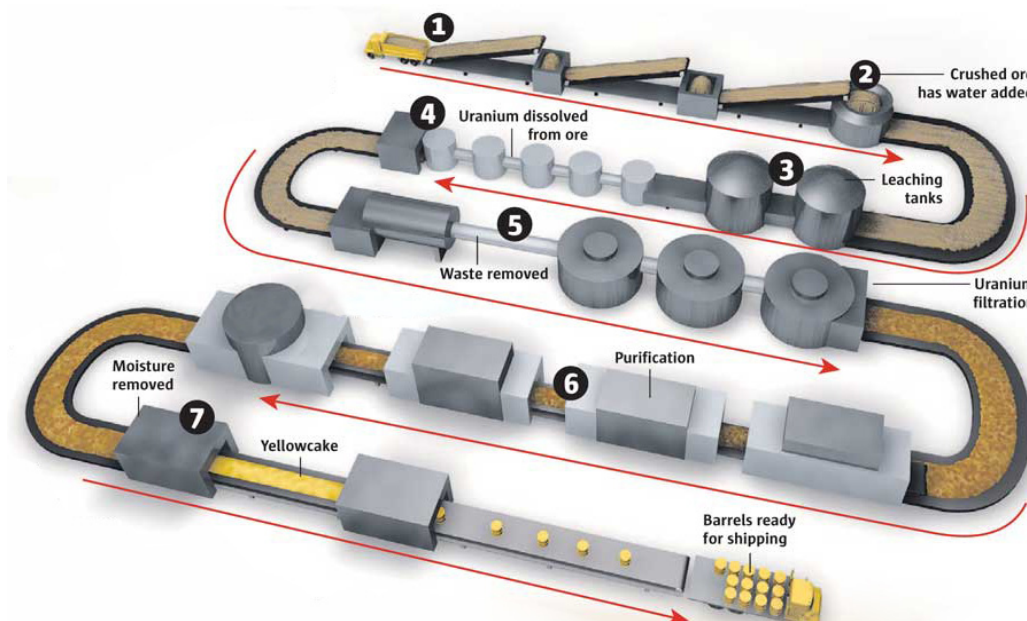
GRAFICO 2. MAGGIORI PRODUTTORI DI URANIO

Fonte: elaborazione dell'autore da dati: World Nuclear Association, *World Uranium Mining Production*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/World-Uranium-Mining-Production/>, aggiornato Luglio 2013.

La produzione, a prescindere dalla localizzazione geografica, si mantiene in mano a grandi multinazionali dell'estrazione come la canadese Cameco, la Rio Tinto Group, BHP Billion, Areva, con eccezioni come la controllata kazaka Kazatomprom o la russa Tvel.

SINTESI DEL PROCESSO DI LAVORAZIONE DELL'URANIO PER LA PRODUZIONE DELLO "YELLOWCAKE"

L'estrazione del minerale di uranio può avvenire con molteplici metodologie che non verranno qui approfondite per ragioni di spazio a disposizione, ma ci si limiterà a citare alcuni passaggi del ciclo di lavorazione successivo all'estrazione da miniera/cava.

Ci si servirà di uno schema semplificato che riepiloga i passaggi principali nella produzione di U_3O_8 (***Figura 2***).

FIGURA 2. PROCESSO DI PRODUZIONE DI YELLOWCAKE

Fonte: elaborazione dell'autore da: Bruce Finley, *Uranium mill clears Western Slope hurdles*, Denver Post, <http://www.denverpost.com/ci_13647439>, aggiornato 27 ottobre 2009.

Il processo prevede che le rocce estratte vengano conferite in un centro di lavorazione, in cui verranno prima polverizzate al fine di ottenere un composto più facilmente lavorabile che verrà successivamente trattato con soluzioni acide per separare il minerale dalle altre impurezze presenti. Queste ultime verranno poi rimosse con la conseguente purificazione dell'uranio e la produzione di ossido di uranio o yellowcake, (***Figura 3)***.

FIGURA 3. LO YELLOWCAKE

Fonte: Uranium Energy Corp., *Yellowcake (U_30_8)processed at UEC's Hobson processing plant from uranium recovered at UEC's Palangana ISR projec*, da Flickr.com, <http://www.flickr.com/photos/uranium_energy_corp/5558924391/>, 27 gennaio 2011.

Le fasi successive sono dedicate alla conversione dell' U_3O_8 in UF_6, od esafluoruro di uranio, una sostanza con caratteristiche di sale, fondamentale per permettere il successivo processo di arricchimento.

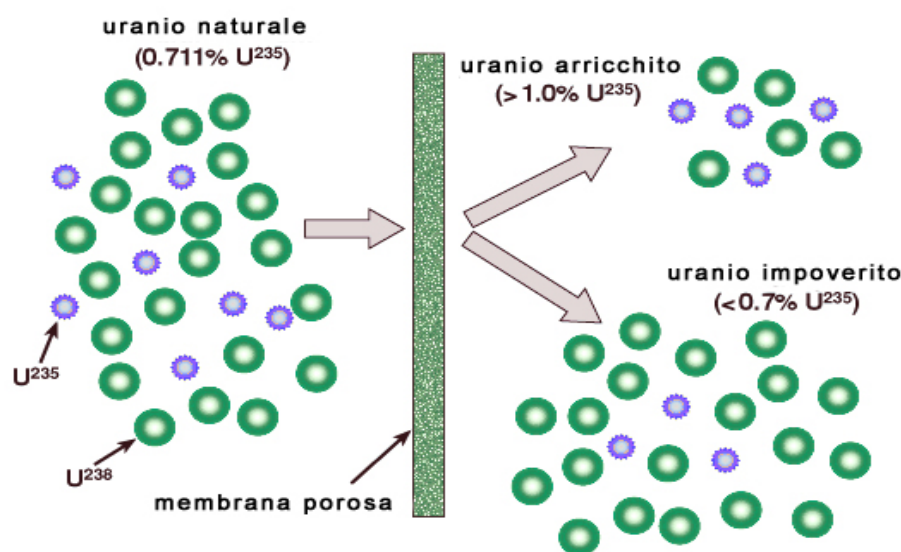
L'ARRICCHIMENTO

La fase di arricchimento può rendersi necessaria a seconda della tipologia di reattore nel quale il combustibile verrà utilizzato, che a sua volta, è determinato da caratteristiche costruttive come la presenza e la tipologia del materiale di moderazione tra le altre. Quindi l'arricchimento non sempre viene eseguito ovvero è effettuato in percentuali variabili.

L'arricchimento sfrutta la caratteristica dell'esafluoruro di uranio di passare allo stato gassoso se riscaldato aanche a temperature modeste.

La procedura si concreta nell'artificiale aumento della percentuale dell'isotopo ^{235}U, definito in gergo uranio fissile, contenuto nell'esafluoruro, riducendo conseguentemente la concentrazione di ^{238}U, od uranio fertile, che è presente in percentuali di circa il 99,3%, insieme al restante 0,7% del suo isotopo più raro, nel minerale di uranio.

I due metodi utilizzabili per l'arricchimento sono costituiti dalla centrifugazione e dalla diffusione gassosa. Quest'ultima modalità, consiste nel "vagliare" il gas in cui si è trasformato l'esafluoruro, forzandolo a transitare attraverso membrane porose in cui gli atomi di ^{235}U presentano maggior facilità a passare rispetto a quelli di ^{238}U.

FIGURA 4. ARRICCHIMENTO PER DIFFUSIONE GASSOSA

Fonte: elaborazione dell'autore da: Nuclear Regulatory Commission, *Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Process*, <http://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac/uranium-enrichment.pdf>, aggiornato 21 maggio 2013.

Si otterrà quindi UF_6 con arricchimento in uranio fissile in percentuali mediamente tra il 2 ed il 4%, a seconda degli usi. La rimanente parte di esafluoruro in cui la percentuale di ^{235}U è più bassa, e non utilizzabile per il combustibile, viene riportata in stato solido dando origine al cosiddetto uranio impoverito. Questa sostanza non deve essere considerata come rifiuto, o quantomeno non in senso stretto, nonostante la definizione, ma si presta a numerosi usi tra cui vi è anche quella di divenire combustibile nucleare per altre tipologie di reattori che si vedranno più avanti, oppure essere trasformato destinato ad altri usi.

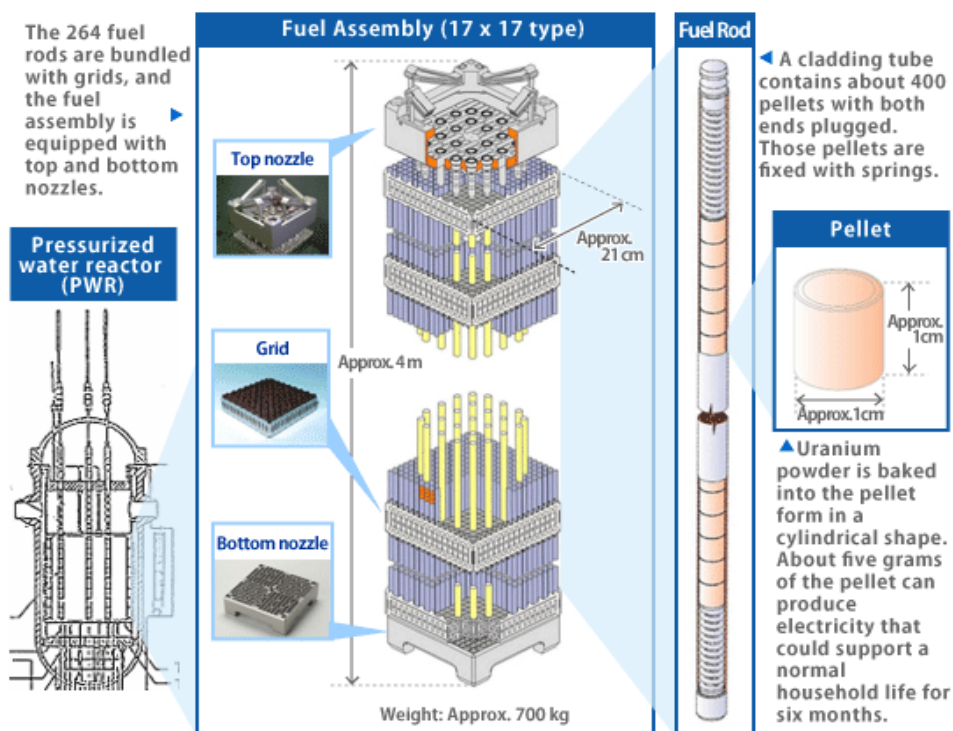
La procedura che si basa sulla centrifugazione, è attualmente quella più utilizzata, e sta progressivamente soppiantando quella basata sulla diffusione. Questo processo sfrutta la differenza nel peso dei due isotopi, 235 e 238, dell'uranio. Gli isotopi 235, più leggeri tendono a rimanere verso il centro della centrifuga, mentre gli altri, più pesanti, tendono a spostarsi verso le pareti esterne. Estraendo il contenuto dal centro della centrifuga e ripetendo il processo, si otterrà esafluoruro via via sempre più arricchito[2]. Una volta raggiunto il livello di arricchimento desiderato, come avveniva per il metodo di diffusione, il gas viene riportato allo stato solido per le successive lavorazioni.

LA PRODUZIONE DEL COMBUSTIBILE

L'esafluoruro di uranio arricchito viene solidificato e trasformato in cosiddetti pellet, piccoli cilindri che costituiscono l'unità di base del combustibile nucleare.

Per essere utilizzati, questi cilindri vengono, in quantità variabili, nell'ordine di alcune centinaia, collocati all'interno di tubi specificamente costruiti per proteggerli ed isolarli. Questi ultimi tubi, verranno poi assemblati assieme al fine di ottenere quello che tecnicamente viene definito un elemento di combustibile o fuel assembly, (***Figura 5***).

[2]How Stuff Works, *What's a uranium centrifuge?*, <http://science.howstuffworks.com/uranium-centrifuge.htm>, s.d[2013?].

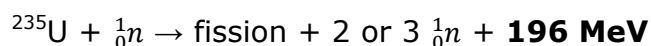
FIGURA 5. ELEMENTO COMBUSTIBILE (PWR)

Fonte: Nuclear Fuel Industries Ltd., *Light-Water Reactor Fuel*, <http://www.nfi.co.jp/e/product/prod02.html>, 2006.

TEORIA DELLA FISSIONE

FENOMENO E REAZIONE A CATENA

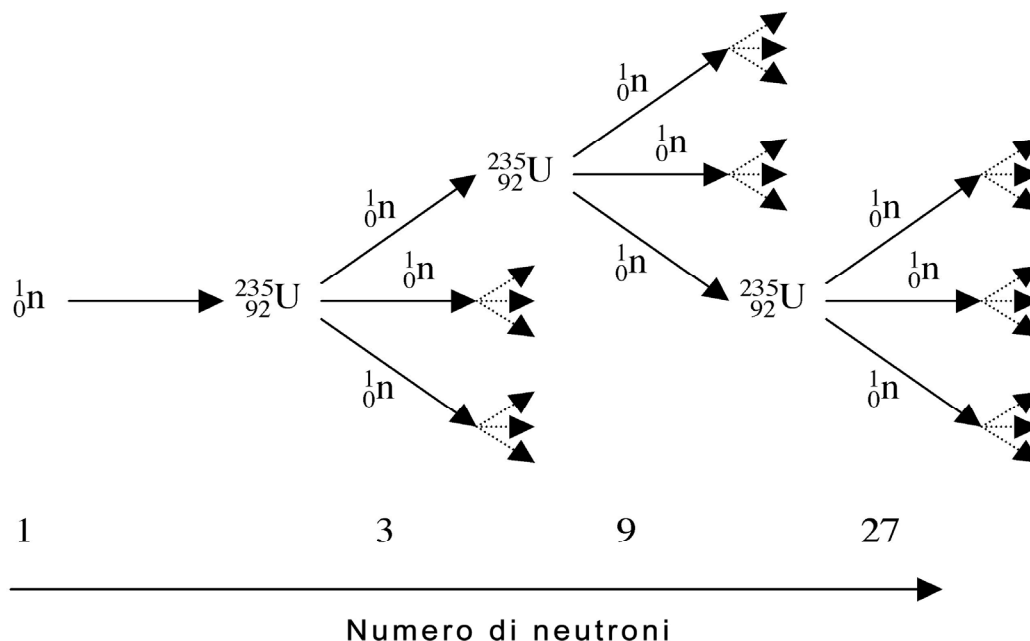
Prima di andare a descrivere le componenti del nocciolo, il suo funzionamento ed il suo contributo all'interno del complesso dell'impianto, è utile esporre il fenomeno fisico su cui si basa la tecnologia, ossia la fissione nucleare.

Un nucleo atomico (prendiamo in oggetto un atomo di ^{235}U), può essere soggetto a fissione quando è colpito da un neutrone, una particella subatomica con carica elettrica nulla. Quando un neutrone colpisce un nucleo atomico di uranio, quest'ultimo si scinde in altri elementi e si assiste anche al rilascio di 2/3 nuovi neutroni. Inoltre la somma della massa dei singoli prodotti di fissione è inferiore rispetto alla massa del nucleo atomico non fissionato, segno che un quantità di questa massa, in conseguenza della collisione, si è trasmutata in energia, secondo la formula[3]:

$$^{235}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow \text{fission} + 2 \text{ or } 3\ {}^{1}_{0}n + \mathbf{196\ MeV}$$

Ad ogni fissione questa quantità di energia liberata è molto contenuta, ma se si considera in relazione all'enorme numero di atomi presenti anche in un solo grammo di uranio, ed

[3] Atomic Archive, *Nuclear Fission: Basics*, <http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission1.shtml>, s.d. [2013?].

all'instaurarsi eventualmente, di una reazione a catena, basata sul rilascio di 2/3 nuovi neutroni che si rendono disponibili a fissionare 2/3 nuovi atomi, appaiono chiare le potenzialità.

FIGURA 6. REAZIONE A CATENA

Fonte: Andrew R. Barron, *Nuclear Chemistry: Nuclear Fission*, Connexions, <http://cnx.org/content/m31328/latest/>, aggiornato 19 agosto 2009.

LA MASSA CRITICA

Uno dei passi miliari e probabilmente il più importante, che portano un reattore nucleare ad operare, è quello della prima criticità. Con questo termine si fa riferimento al momento in cui vengono raggiunte le condizioni tali per cui il processo di fissione è in grado di autosostentarsi, senza immissione di energia dall'esterno.

Come rimanda il termine, l'elemento fondamentale alla base di tutto ciò, è la costituzione di una massa critica, ossia di particolari caratteristiche dell'elemento fissile che lo permettano.

La massa critica dipende da alcuni fattori di cui i principali sono:

- la disposizione spaziale del materiale
- la composizione e la densità del materiale
- il livello di purezza del materiale

Questi fattori permettono di mettere in chiaro come un reattore non sia, come alcuni lo ritengono, una "bomba nucleare". Nel primo caso infatti, la disposizione spaziale del materiale è fatta in modo da controllare l'emissione neutronica che si origina dalle fissioni in modo tale da controllare in sicurezza la reazione ed evitare che essa aumenti esponenzialmente, mentre nel secondo caso, l'obiettivo è, all'opposto, far si che vi sia la

massima emissione neutronica nel più breve tempo possibile in modo tale da fissionare il maggior numero di atomi favorendo una reazione a catena con appositi "riflettori" che limitino la dispersione di particelle. Nel caso di un ordigno atomico poi, il materiale fissionabile, oltre ad essere arricchito in percentuali notevolmente superiori al 4%, nell'ordine del 90%[4], è modellato in forme tendenzialmente sferiche, al fine di avere la minima superficie per una data massa. Anche questa è una notevole differenza con gli elementi di combustibile, di forma tendenzialmente parallelepipeda.

FISSIONE NUCLEARE CONTROLLATA

IL CONTROLLO DELL'ECONOMIA NEUTRONICA

Il controllo del numero di neutroni disponibili a fissionare gli atomi di ^{235}U, è quindi uno dei punti focali su cui si sono concentrati inizialmente gli studi al fine dello sfruttamento civile del nucleare nel mondo.

Per garantire una reazione nucleare autosostenuta, ma controllata, è necessario che ad ogni fissione, e conseguente rilascio dei 2/3 nuovi neutroni, solo uno di questi sia disponibile a fissionare un altro nucleo di uranio. E' forse più chiaro comprendere l'aspetto essenziale del controllo del numero di neutrono liberi se si analizzano gli altri due casi che si possono verificare:

1. ad ogni fissione meno di un neutrone va a colpire un nuovo nucleo fissile, il numero di neutroni diminuisce e il fenomeno di auto-estingue;
2. ad ogni evento, più di un neutrone va a colpire un altro nucleo fissile, facendo si che la reazioni diventi incontrollata, con un effetto domino tale che quest'ultimo porta alla liberazione di una quantità di energia non più gestibile.

Per gestire l'economia neutronica, si richiede perciò un elemento in grado di sottrarre i neutroni liberi in eccesso, e non renderli disponibili a nuove fissioni. Ecco quindi che per tale compito sono stati concepiti dei dispositivi che vanno sotto la classe di *barre di controllo*, in grado di "sequestrare" i neutroni in esubero non desiderati.

NEUTRONI VELOCI E LORO MODERAZIONE

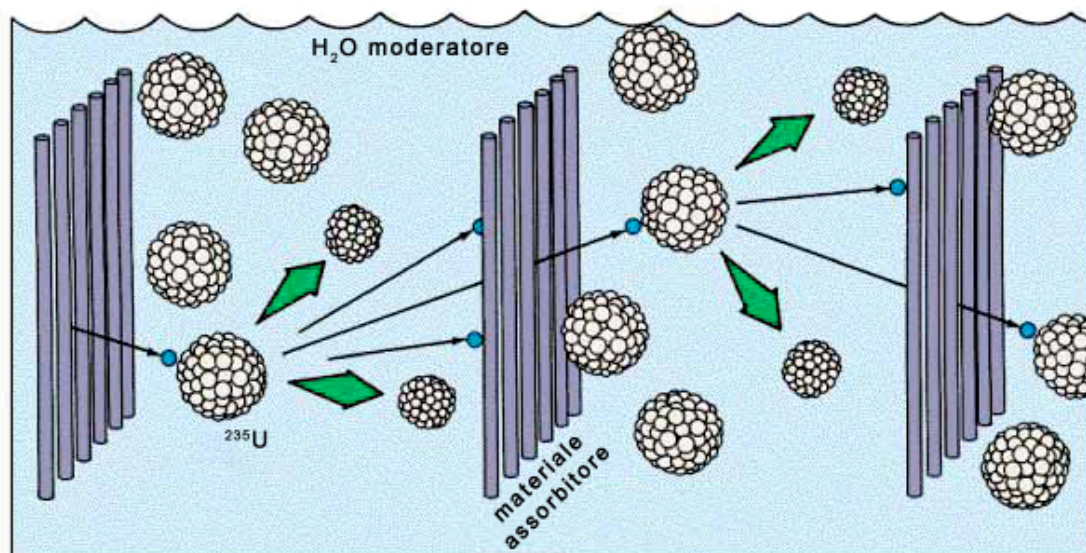
Un'altra problematica che nasce, e si ripercuote su quanto finora esposto, consta nella necessità di "moderare" i neutroni al fine di controllare efficacemente la reazione.

[4] How Stuff Works, How Nuclear Bombs Work, < http://science.howstuffworks.com/nuclear-bomb3.htm>, s.d. [2013?]

Come già detto, i neutroni sono particelle subatomiche con carica pari a zero e, a differenza di altre particelle cariche, come per esempio i protoni, carichi positivamente, che perdono energia quando attraversano la materia, il neutrone risente solo marginalmente di queste forze. Ciò fa si che, a causa della loro velocità, nonché della ridotta sezione trasversale dei nuclei rispetto allo spazio che li separa tra loro, la particella percorra grandi distanze prima di collidere con un nucleo e ciò inoltre avviene comunque raramente. E' quindi necessario ovviare a questo stato di cose, al fine di poter instaurare una condizione caratterizzata da una certa costanza e prevedibilità nel numero di reazioni, che determineranno conseguentemente una costanza nella potenza termica del reattore.

La soluzione a queste problematiche, è posta in essere attraverso l'utilizzo di materiali moderatori, in grado di rallentare i neutroni e favorire l'interazione di questi ultimi, sia con i nuclei fissili[5], sia con le barre di controllo, per una migliore gestione dell'economia neutronica.

Nell'immagine di ***Figura 7*** viene offerta una rappresentazione grafica del compito assolto dal moderatore, in questo caso acqua naturale, e di un materiale assorbitore di neutroni, resi questi ultimi, attraverso i pallini azzurri.

FIGURA 7. MATERIALE ASSORBITORE E MODERATORE DEI NEUTRONI

Fonte: Environmental Science, *Chapter 14: Fig. 14.7*, Apesnature Homestead, <http://apesnature.homestead.com/chapter14.html>, 2013.

5 Richard A. Muller, Richard A., Nuclear Reactors, the China Syndrome, and Waste Storage, <http://muller.lbl.gov/teaching/physics10/old%20physics%2010/chapters%20(old)/8-ChinaSyndrome.html>, 2001

DESCRIZIONE DELLE COMPONENTI INTERNE DEL NUCLEO DI UN REATTORE NUCLEARE

Il reattore è il dispositivo centrale di un'installazione di produzione nucleotermoelettrica. Al suo interno avviene la reazione di fissione e la generazione del calore, che verrà utilizzato per la produzione del vapore, necessario al funzionamento delle turbine, che a loro volta genereranno energia elettrica attraverso la loro rotazione.

I concetti teorici di moderatore e di assorbitore sono già stati introdotti e si procederà ora a presentarne i componenti ingegneristici nei quali questi concetti sono confluiti.

IL MODERATORE

La moderazione dei neutroni veloci è resa possibile da elementi che, a seconda della tipologia del reattore, possono essere costituiti da diversi materiali. Tra i principali troviamo:

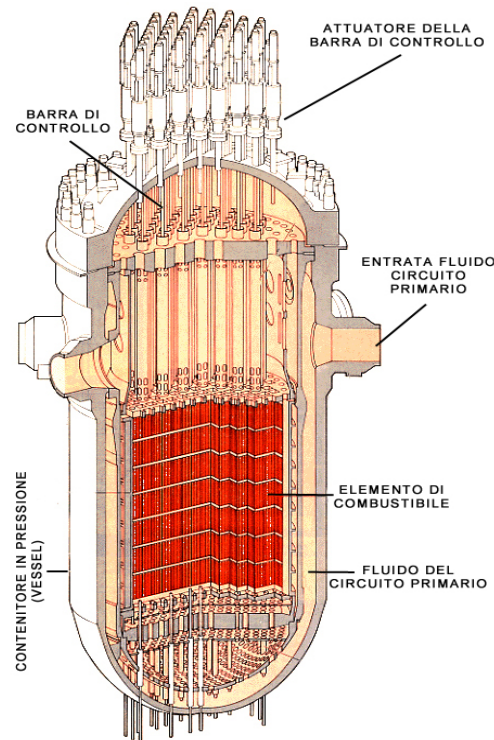
- Deuterio: componente principale della cosiddetta "acqua pesante". Possiede un grado di cattura neutronica, ossia di capacità di sottrarre neutroni ad interazioni con altri atomi, inferiore rispetto a quella dell'acqua naturale
- Grafite: è una delle varie forme in cui si struttura il carbonio e viene utilizzata in forma pura.
- Acqua naturale: comune acqua demineralizzata. Ha il vantaggio rispetto alla altre soluzioni di essere facilmente disponibile, anche se il suo grado di cattura neutronica è molto più elevato di quello dell'acqua pesante, e ciò obbliga ad un maggior arricchimento del combustibile.

BARRE DI CONTROLLO

Come preannuncia il nome, sono barre costituite da elementi grandi assorbitori di neutroni, come per esempio il boro, che sono alloggiate in appositi spazi all'interno del reattore e possono essere estratte o reinserite gradualmente mentre la fissione è in corso[6]. Ciò si rende necessario primariamente a causa dei sottoprodotti di fissione che si generano, molti dei quali sono assorbitori di neutroni, che "avvelenano" la reazione forzandola all'estinzione. Le barre di controllo in questo caso, possono essere più o meno estratte al fine di compensare questi fenomeni. Ma esse possono anche essere reinserite completamente, al fine di operare rapidi cambiamenti allo stato del reattore, come nel caso del suo spegnimento, (***Figura 8)***.

---

[6]James Grayso, *Control rods in nuclear reactors*, <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/grayson1/>, 17 febbraio 2011.

FIGURA 8. SEZIONE VESSEL REATTORE

Fonte: Felice Ippolito (a cura di), *Energia dall'atomo*, *Le Scienze (quaderni)*, n°3, 1982, 26

FLUIDO REFRIGERANTE

Il calore prodotto dalla reazione deve essere sottratto al nocciolo, al fine del suo sfruttamento per la produzione di energia, ma anche per garantire l'integrità strutturale del sistema. Ciò è reso possibile dalla circolazione, all'interno del contenitore o *vessel* del reattore, ed all'esterno, attraverso un ciclo chiuso che transita in un complesso di tubazioni, di un fluido, sia esso: gas, acqua, o metallo fuso. Il sistema prende il nome di circuito primario.

ELEMENTI DI COMBUSTIBILE

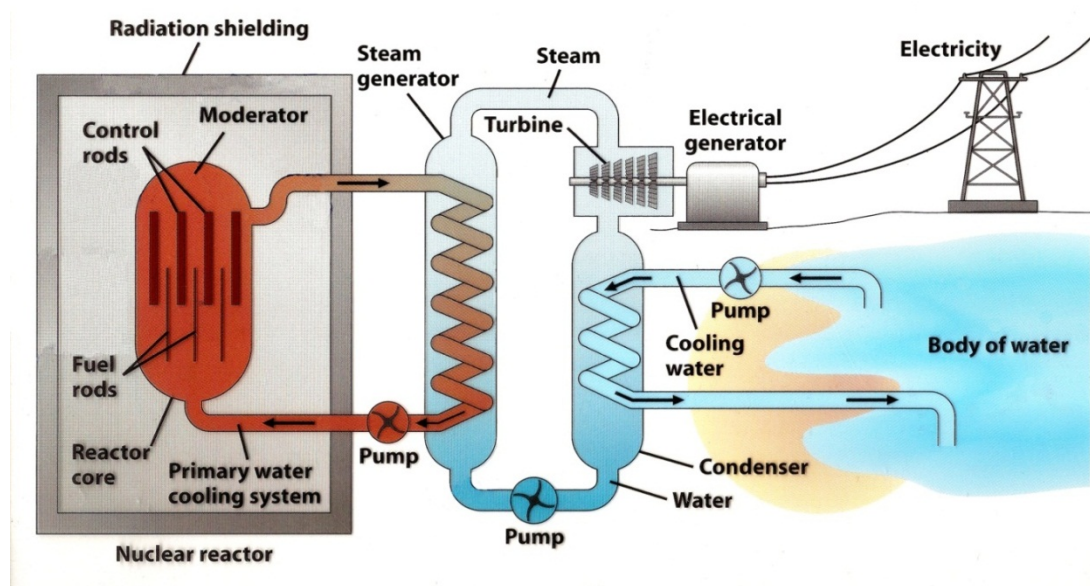
Sono costituiti da fasci di tubi in cui sono collocati i pellet di uranio, di cui già precedentemente si è avuto modo di trattare.

FUNZIONAMENTO DEL COMPLESSO DI UN IMPIANTO NUCLEARE

Avendo esposto le basi scientifiche della fissione, nonché i componenti principali del nucleo, è opportuno fissare brevemente il funzionamento di un impianto teorico nel suo complesso, aiutandoci con lo schema di ***Figura 9***.

Il ciclo inizia con la criticità del reattore e la conseguente produzione di energia termica a seguito della fissione degli atomi di uranio. Il fluido termovettore viene fatto circolare

generalmente per mezzo di pompe all'interno del circuito primario, transitando quindi all'interno del reattore, dove si riscalda sottraendo calore a quest'ultimo, e dirigendosi successivamente fuori dal vessel dove incontrerà uno scambiatore. Il fluido del circuito primario a questo punto, cede il calore in esso immagazzinato attraverso lo scambiatore e successivamente, questo calore verrà utilizzato per la generazione di vapore. Questo vapore prodotto, raggiunge ed aziona, una o più turbine che, collegate ad un generatore (dinamo), trasformano l'energia meccanica di movimento in energia elettrica che verrà immessa nella rete. Una volta sfruttato, il vapore a bassa temperatura viene condensato, grazie all'apporto di acqua dall'esterno generalmente. Questo processo si ripete poi ciclicamente, ripartendo dall'inizio.

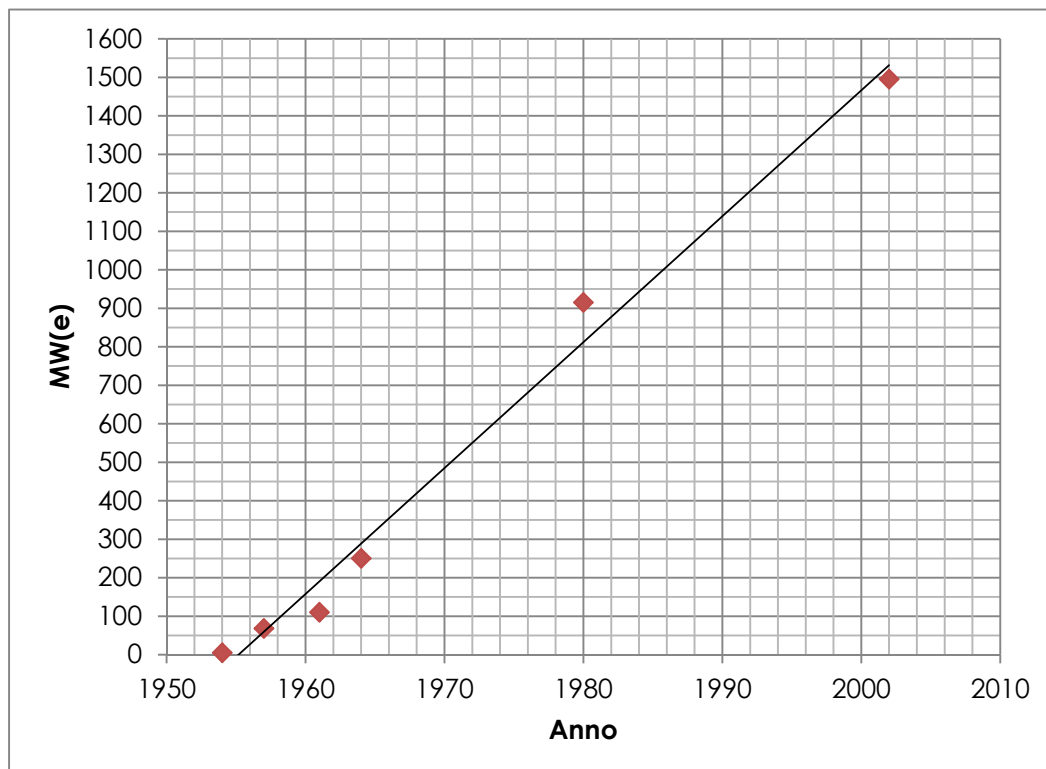
FIGURA 9. SCHEMA DI UN IMPIANTO NUCLEARE

Fonte: American Chemical Society, *Chemistry in the community: Figure 6.61*, s.l., W.H. Freeman and Company, 2007, 498

PRINCIPALI FILIERE DI IMPIANTO NUCLEARE

PWR (PRESSURISED WATER REACTOR): traduzione di reattore ad acqua in pressione. E' un reattore moderato e refrigerato ad acqua leggera e fa parte quindi della macro-categoria dei reattori LWR (Light Water Reactor). Il termine: "in pressione", è determinato dalla presenza di un pressurizzatore che opera sul fluido del circuito primario, ad un valore predeterminato.

Il PWR è un design inizialmente sviluppato negli Stati Uniti per permettere la propulsione in applicazioni nautiche, cosa che portò alla creazione del primo sottomarino dotato di reattore

nucleare nel gennaio del 1955, il "Nautilus". Parallelamente, la tecnologia era oggetto di sviluppo da parte Sovietica, sfociando in un impianto terrestre per la produzione di energia elettrica nel luglio del 1954, seppur in via per lo più sperimentale. La potenza in quest'ultima applicazione era molto modesta, circa 5MW(e), ma come si avrà modo di vedere, l'evoluzione tecnica, nel giro di pochi anni, compirà miglioramenti sensibili. Per avere un'idea di questa rapida evoluzione si rimanda al ***Grafico 3.***

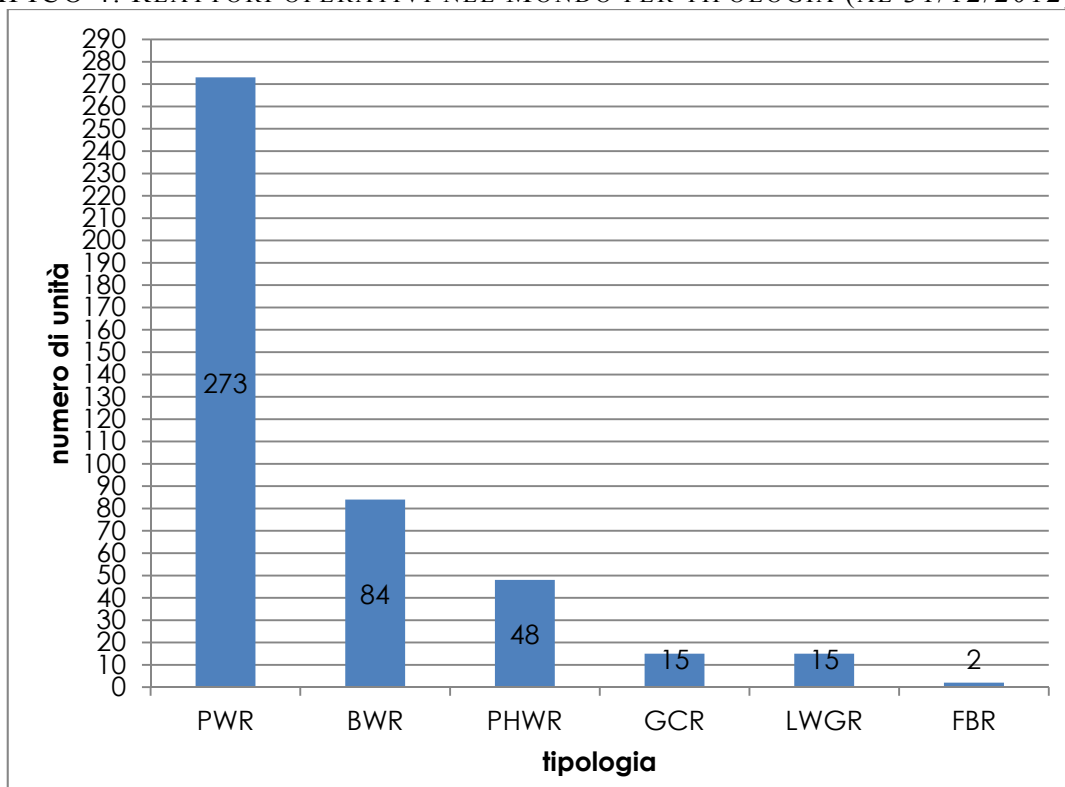
GRAFICO 3. INCREMENTO POTENZA PWR IN FUNZIONE DEL TEMPO

Fonte: eleborazione dell'autore da dati da:Bruno Guerrini, Sandro Paci, *Appunti di impianti nucleari, parte 2A: filiere*, Dispensa di corso, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, a. acc. 1998-1999, 19

Saranno gli Stati Uniti a tracciare il percorso da seguire, e già alla fine del 1957, il reattore di "Shippingport", raggiunge i 68MW(e). Nel 1961, "Yankee Rowe" si attesta a 110MW(e), successivamente incrementati a 185MW(e). Sulla base di questo impianto è stata progettata anche una delle centrali nucleari italiane, quella di Trino Vercellese, ma certificata per una maggiore potenza, di 250MW(e)[7].

Lo sviluppo progressivo di questa tecnologia ha permesso di rendere disponibili ad oggi, versioni di PWR con potenze nell'ordine di 1500MW(e), tanto da essere la filiera più affermata al mondo per numero di installazioni[8], (***Grafico 4).***

[7] Bruno Guerrini, Sandro Paci, *Appunti di impianti nucleari, parte 2A: filiere*, Dispensa di corso, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, a. acc. 1998-1999, 19

[8] International Atomic Energy Agency, Nuclear Power Reactors in the World: 2013 edition, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 74

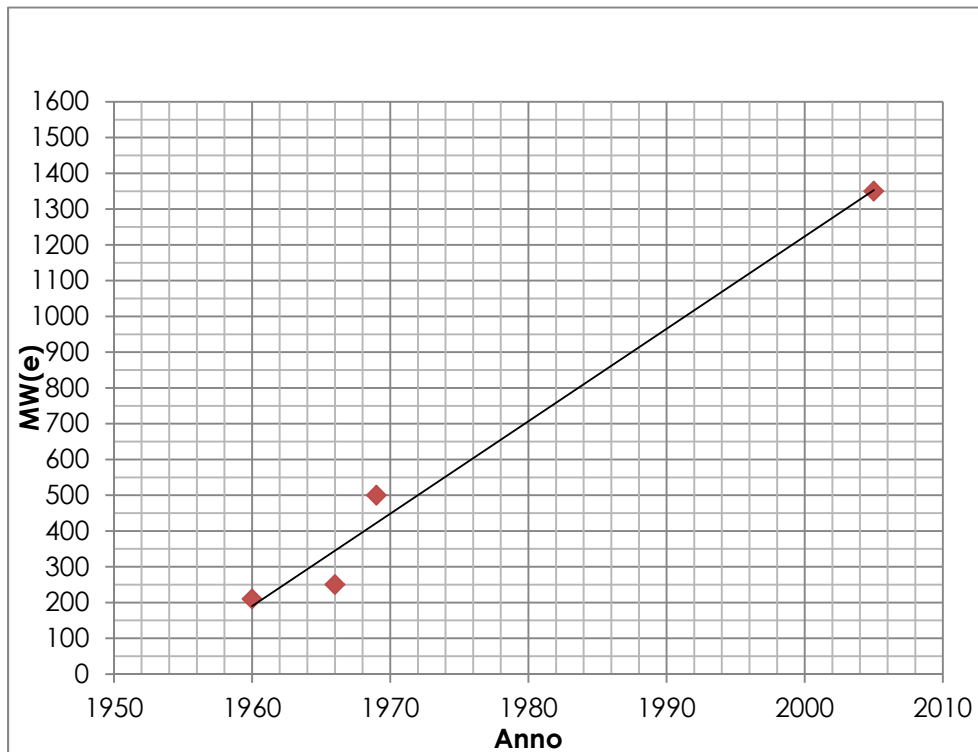
GRAFICO 4. REATTORI OPERATIVI NEL MONDO PER TIPOLOGIA (AL 31/12/2012)

Fonte: International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 74

SOTTOCATEGORIE PWR

- VVER: reattori di concezione Sovietica di tipo ad acqua pressurizzata, che presentano differenza costruttive, ma stessa base di funzionamento, rispetto a quelli occidentali. L'obiettivo è quello di fornire reattori che adottano soluzioni alternative per affrontare gli alti costi conseguenti alla costruzione delle opere di contenimento dei reattori USA, pur garantendo un alto grado di sicurezza.
- CPR: acronimo di China Pressurised Reactor. Versione per il mercato cinese di proprietà intellettuale Areva, con potenza di 1000MWe, costi e tempi di costruzione ridotti. Secondo progetto la vita degli impianti sarà inoltre superiore a impianti di precedente generazione. Attualmente sono operativi sul suolo cinese 4 reattori di questo tipo, ed altri 19 dovrebbero raggiungere questa condizione tra il 2012 ed il 2018.

BWR (BOILING WATER REACTOR) Il reattore ad acqua bollente costituisce un altro approccio rispetto al PWR, pur rientrando anch'esso, nella macro-categoria dei LWR. Rispetto al reattore ad acqua in pressione, il BWR utilizza, direttamente nel circuito primario, acqua allo stato di vapore, permettendo quindi l'eliminazione del dispositivo di generazione.

Conferme sulla fattibilità dell'idea risalgono a test sperimentali di metà anni '50[9], mentre definitive conferme vengono raggiunte nel 1959. Come si era già verificato con i PWR, anche le centrali che utilizzano reattori BWR, vedono, nel corso della loro evoluzione, un enorme sviluppo sia in termini di numero di installazioni, sia di incrementi di potenza, costituendo attualmente la seconda più comune tipologia di reattore nucleotermoelettrico al mondo, come risulta dal ***Grafico 5.***

GRAFICO 5. INCREMENTO POTENZA BWR IN FUNZIONE DEL TEMPO

Fonte: eleborazione dell'autore da dati da: Bruno Guerrini, Sandro Paci, *Appunti di impianti nucleari, parte 2A: filiere*, Dispensa di corso, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, a. acc. 1998-1999, 59,60

Seguendo un ordine cronologico, si può verificare come già nel 1960 la potenza raggiungeva i 210MW(e), passando ai 500MW(e) della centrale di "Oyster Creek".

Come già accennato, il progetto BWR della General Electric, ha raccolto molta fortuna anche dal punto di vista delle esportazioni. Un esempio di ciò sono le centrali italiane di Garigliano e di Caorso.

L'attuale stato dell'arte è costituito dall' ABWR ("Advanced"), primo reattore di terza generazione costruito ed operativo, ultima evoluzione della serie BWR.

[9] Susan M. Stacy, *Proving the Principle*, Idaho Falls, Idaho Operations Office of the Department of Energy, 2000, 260

HWR (HEAVY WATER REACTOR): acronimo per reattore ad acqua pesante. Un paese che vuole dotarsi di impianti per la generazione di energia elettrica da nucleare deve tenere in considerazione la sua capacità di accedere a combustibile arricchito o a disporre di impianti di arricchimento sul suo territorio. Se queste vie sono precluse, per ragione di scelta o limitazioni politiche, è necessario prendere in considerazione di ricorrere ad impianti alimentati ad uranio naturale. Come si era detto in precedenza, l'uranio naturale possiede una concentrazione di isotopo fissile ^{235}U pari allo 0,7%, quindi troppo limitata per essere usato, senza arricchimento, in un impianto LWR, ma sufficiente se lo si utilizza in un reattore che utilizza l'acqua pesante come moderatore. Inoltre i reattori appartenenti a questa filiera, offrono la possibilità di produrre energia anche dalla frazione di plutonio fissile prodotto dal bombardamento neutronico del ^{238}U. Questo fa si che gli impianti HWR siano in grado di sfruttare più efficacemente il combustibile, con una minor incidenza di quest'ultimo sul costo dell'energia prodotta, rispetto agli altri impianti LWR.

Il carattere distintivo della filiera HWR, è rappresentato dal moderatore, ma esistono numerose sotto-filiere che si differenziano sostanzialmente per l'utilizzo di diverse soluzioni per il fluido del circuito primario, che non si andranno ad analizzare, ad eccezione della tipologia CANDU, data la sua importanza come principale esponente della filiera HWR.

CANDU (CANADIAN DEUTERIUM URANIUM). Questa filiera rappresenta la risposta canadese alla necessità di utilizzare combustibile arricchito che obbliga a dotarsi di costosi impianti di arricchimento, che altresì rappresentano una minaccia dal punto di vista della proliferazione atomica, a causa della loro possibile utilizzazione per arricchire l'uranio a livelli "weapons grade" (80-90%).

Inoltre la tipologia CANDU è in grado di "bruciare", varie tipologie di combustibile, permettendo di ridurre l'incidenza anche dell'uranio naturale sul costo dell'energia, sfruttando per esempio miscele di uranio e plutonio (MOX) proveniente da armi nucleari smantellate per esempio, contribuendo alla riduzione della loro proliferazione, o da altri processi. Anche gli elementi di combustibile ormai esausto derivante da reattori LWR può costituire ancora una fonte di energia, dal momento che questi reattori procedono al "refuelling", ossia alla sostituzione dei vecchi elementi con nuovi, quando i primi hanno un contenuto di ^{235}U sempre comunque maggiore allaa concentrazione che si ritrova nell'uranio naturale.

I reattori CANDU, e più in generale la filiera HWR, si candida come un componente essenziale per lo sfruttamento, anche se indirittamente, del torio, metallo economico molto più diffuso sulla superficie terrestre rispetto all'uranio e non soggetto ai rischi della proliferazione, e con notevoli vantaggi in tema di pericolosità delle scorie. Il ruolo dei reattori

ad acqua pesante all'interno del cosiddetto "ciclo del torio" verrà chiarito più avanti nel testo, quando si tratterà del caso del nucleare Indiano.

ALTRE TIPOLOGIE

Di seguito vengono riportati i rimanenti principali tipi di reattori operativi nel mondo ma che vedono un loro impiego limitato, od in specifici paesi:

- GCR (Gas-Cooled Reactor). I reattori raffreddati a gas appartengono oramai ad una filiera obsoleta, sviluppata indipendentemente ma nello stesso periodo, dal Regno Unito, con il design Magnox, e dall Francia con la tipologia UNGG.

  I reattori GCR utilizzano CO_2 o elio come fluido del circuito di raffreddamento, e la grafite come moderatore di neutroni, e sono in grado di utilizzare uranio naturale come combustibile. Proprio quest'ultima caratteristica è stata fondamentale per la loro adozione, considerando che ciò è avvenuto negli anni '50, in piena Guerra Fredda. L'utilizzo di uranio naturale permetteva infatti la produzione di energia ma anche di plutonio, ^{239}Pu, per armamenti.

  Del suo sviluppo successivo, l'AGR ("Advanced"), risultano ancora attivi una quindicina di reattori sul suolo Inglese.

- LWGR (Light Water Graphite Reactor). Sono reattori moderati a grafite, raffreddati ad acqua bollente ed alimentati ad uranio arricchito.

  Il design di riferimento per questa filiera è l'RBMK sovietico, un reattore ad elevata potenza realizzato solamente in Russia ed in altri territori del'URSS, in cui è ancora attivo in numerose unità.

  A questa tipologia apparteneva anche il reattore 4 della centrale Lenin di Chernobyl.

- FBR (Fast Breeder Reactor). Si tratta di un reattore nucleare a neutroni veloci autofertilizzante. Come la dicitura suggerisce, nel reattore i neutroni non sono moderati ma presenti nella loro forma ad elevata energia. L'utilizzo di questi ultimi, poco influenzati dal fenomeno di cattura neutronica dei materiali, permette un'ampia libertà nella scelta del combustibile da utilizzare. In generale questo è costituito, oltre che da uranio arricchito, da composti o leghe metalliche di Pu-U.

  Un altro elemento fondamentale che suscita l'interesse per questo design, è ricoperto dalla capacità del reattore, di produrre più materiale fissile di quanto ne venga consumato. Va specificato che ciò non significa che il reattore possa funzionare all'infinito, ma che il sistema è in grado di produrre isotopi fissili se alimentato a isotopi fertili, e raggiungere così un grado di sfruttamento del combustibile molto

maggiore rispetto ad i reattori attualmente più efficienti, come i CANDU, che raggiungono valori nell'ordine del 50-60%.

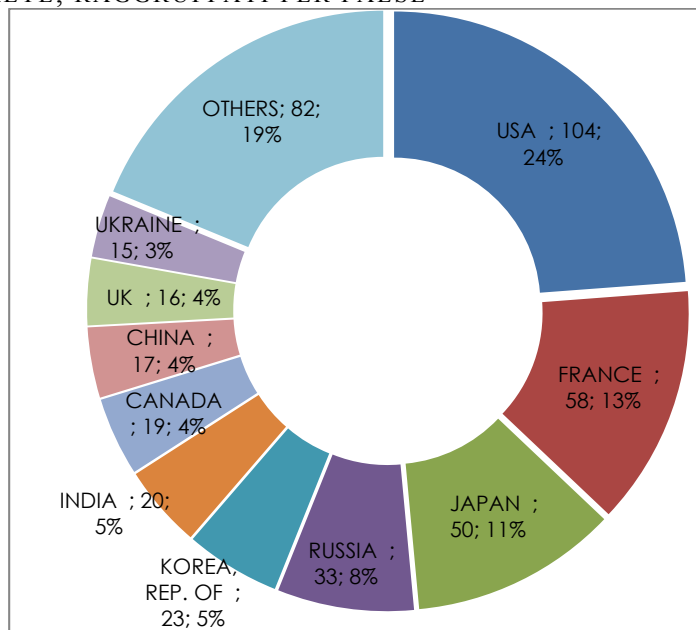
Gli impianti in costruzione, e quelli che sono stati operativi in passato, sono di tipo LMFB ("Liquid Metal"), ed in particolare raffreddati a sodio liquido.

Passate esperienze di FBR sono state: il Superphenix francese, chiuso nel 1998 ed il progetto Monju giapponese solo per citare due esempi. Attualmente grande interesse è riposto in questa tecnologia da parte soprattutto della Russia, con il proprio design BN, mentre in India è in costruzione un reattore sperimentale e ricerche sono portate avanti anche dalla Cina. Per il lungo termine, è da citare che metà delle proposte più promettenti per i futuri impianti di IV generazione, sono basate sulla filiera FBR.

I REATTORI NUCLEARI NEL MONDO

La localizzazione, come l'entità numerica dei reattori non è uniformemente distribuita. Ciò è determinato sia dalla necessità di possedere il know-how necessario alla progettazione, costruzione e gestione degli impianti, sia dalla disponibilità nel rifornirsi del combustibile o dei mezzi per autoprodurlo e, fondamentalmente, dai capitali necessari.

Il ***Grafico 6*****,** tratto dal report annuale dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica, riporta la situazione dei reattori connessi alla rete al 31 dicembre 2012. Dai dati si ricava come il maggior detentore di reattori a scopi civili rimangano gli Stati Uniti, che di conseguenza, risultano anche i maggiori produttori di energia nucleotermoelettrica. A seguire troviamo la Francia, con 58 reattori, primo produttore europeo. Nella lista dei paesi con almeno quindici reattori troviamo: il Giappone con 50, la Russia, la Corea del Sud, l'India, la Cina, il Regno Unito, e a chiudere l'Ucraina.

GRAFICO 6. NUMERO E PERCENTUALE SUL TOTALE MONDIALE DEI REATTORI CONNESSI ALLA RETE, RAGGRUPPATI PER PAESE

Fonte: International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 12

Possiamo a questo punto, individuare tre macro-gruppi nei quali suddividere questi paesi, sulla base delle motivazioni e della tempistica di adozione della tecnologia atomica:

- Paesi precursori, che per primi hanno sviluppato la tecnologia nucleare

  In questo gruppo rientrano gli USA, la Russia, Il Regno Unito, Francia e Canada. Sono le nazioni che per prime hanno condotto studi su questo tipo di energia grazie a solide strutture di ricerca nonché a conoscenze scientifiche pregresse. Inizialmente, e in modo più rilevante questo valeva per la Russia, al tempo facente parte del'URSS ed USA, le ricerche nel campo nucleare costituivano un'evoluzione successiva dei progetti di armamento atomico. In particolare è emblematico il caso degli Stati Uniti, in cui furono proprio gli inaspettatamente elevati costi del programma di armamenti durante, e successivamente la Seconda Guerra Mondiale, a dare impulso allo sviluppo del nucleare civile per giustificare questi costi agli occhi della collettività [10]. Ciò venne inoltre supportato dal potere legislativo, con l'emanazione dello: "*United States Atomic Energy Act*" del 1946, e successivamente con un nuovo testo, nel 1954, con i quali si incoraggiarono le imprese private a costruire reattori nucleari grazie a condizioni economiche favorevoli ed una agevolazione dal lato burocratico e della regolamentazione del settore. Ma l'incentivo più rilevante sarebbe arrivato nel 1957, sotto il nome di: "*Price Anderson Act*", che prevedeva un supporto federale all'industria, ed una

[10] John Byrne and Steven M. Hoffman, *Governing the Atom: the Politics of Risk*, New Jersey, Transaction Publishers, 1995, 136

limitazione della responsabilità dele utilities, le imprese produttrici di energia elettrica, in caso di un eventuale grave incidente[11].

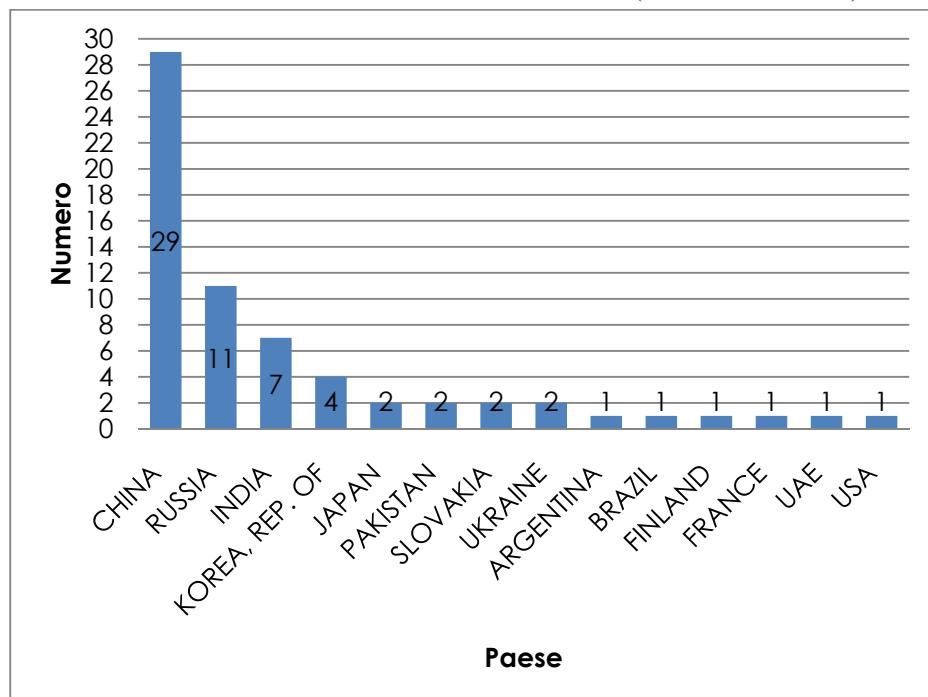
- Paesi innovatori

  E' il caso del Giappone e della Corea del Sud che, sfruttando inizialmente le tecnologie dei paesi precursori, hanno costruito una propria industria nucleare indipendente. Ciò è stato reso possibile grazie alle sinergie internazionali che sono state poste in essere tra le proprie industrie e quelle degli altri paesi occidentali. La conseguenza di queste pratiche ha fatto si che alcune industrie nazionali siano diventate leader mondiali nella progettazione e nella fornitura di impianti nucleari anche per l'estero.

- Paesi in rapido sviluppo

  I paesi che crescono in maniera molto sostenuta, sono costretti a ricercare nuove fonti alternative ai combustibili fossili per garantire questa crescita.

  La Cina e l'India sono i due paesi che si trovano in questa fase, e stanno investendo rilevanti sforzi nel nucleare per far fronte al crescente fabbisogno energetico. Questo è chiaro dal numero di reattori in costruzione alla fine del 2012, dove questi risultano ben 29 in Cina e 7 in India, (***Grafico 7).***

GRAFICO 7. REATTORI IN COSTRUZIONE NEL MONDO (AL 31/12/2012)

Fonte: Fonte: International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 13

[11] United States Nuclear Regulatory Commission, *Fact Sheet on Nuclear Insurance and Disaster Relief Funds*, < http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/funds-fs.html> giugno 2011

Una nota alla **Grafico** *7* è doverosa per quanto riguarda la Russia, che con 11 reattori in costruzione ha ripreso a puntare sul nucleare, sia per far fronte alla crescente richiesta interna di energia, sia in considerazione dell'obsolescenza deli impianti, la maggior parte costruiti prima della caduta del Muro di Berlino.

I nuovi impianti in costruzione al 31/12/2012, costituiscono il 15% del totale di quelli già collegati alla rete, e ciò sembra un dato che dimostra come l'interesse per il nucleare sia da considerarsi ancora rilevante nel Mondo.
In relazione al tema dell'attuale interesse nella costruzione di nuove installazioni atomiche, si sente da alcune parti affermare che l'energia nucleare sia, a livello globale, in declino, ed i paesi i quali la stanno utilizzando, si starebbero disimpegnando in favore della generazione elettrica da fonti fossili convenzionali e da rinnovabili. Queste affermazioni risultano aderenti alla realtà solo in casi ben identificabili, e più specificatamente nel caso della Germania, la quale ha intrapreso un percorso di graduale disimpegno.

IL CASO TEDESCO

Negli anni '80, la Germania ricopriva il posto di secondo paese in Europa Occidentale, dopo la Francia, per numero di impianti sul suo territorio (considerando Germania Ovest ed Est).
Il parco nucleare era costituito sia da impianti BWR e PWR di concezione occidentale, sia da impianti di concezione sovietica che insieme, nell'anno 1985, producevano attorno al 31% del totale dell'energia immessa in rete. Questa strategia era sostenuta dalla necessità di assicurarsi una fonte energetica che permettesse di far fronte alla domanda, ma rendendosi maggiormente indipendenti dalle fonti fossili, in particolare dal petrolio, che a metà anni '70 era stato oggetto di gravi crisi.
Gli eventi legati alla riunificazione negli anni '90, hanno spinto alla chiusura gli impianti VVER sovietici per la anti-economicità del loro necessario aggiornamento a standard occidentali. Questa richiesta derivava dai fatti successi solo pochi anni prima a Chernobyl, che al tempo avevano anche portato il governo tedesco a dichiarare di voler abbandonare il nucleare entro dieci anni.
Bisognerà però arrivare fino all'anno 2000, perché si giunga ad un accordo che preveda un tempo limite all'operatività degli impianti, accordo che sarò rinegoziato nel settembre 2010, prorogando ancora la vita delle strutture ma introducendo una *fuel tax* con lo scopo di finanziare la diffusione delle rinnovabili, in aggiunta ad un contributo, con il medesimo obiettivo, dipendente dall'energia prodotta.

La vicenda vede un'accelerazione nel maggio del 2011, quando il Parlamento tedesco approva un piano per la progressiva chiusura di tutti i reattori sul proprio territorio, entro il 2022. La decisione, in linea con il percorso intrapreso negli anni precedenti, è anche frutto di quanto successo solo poche decine di giorni prima nel sito di Dai-ichi in Giappone. Al fine di assicurare la soddisfazione del fabbisogno energetico della nazione, il Parlamento approverà un piano per compensare la minor produzione elettronucleare, attraverso fonti rinnovabili, e la costruzione di nuovi impianti a carbone e gas. Nonostante queste scelte strategiche, non è sicuro che la Germania non sarà constretta ad importare maggiori volumi di gas, soprattutto dalla Russia, nonché elettricità, prodotta per la maggior parte dal nucleare in Francia.
Sulle incognite relative alla politica energetica si innesta altresì la disputa tra il governo e le utilities. Le tensioni nate a seguito dell'introduzione della *fuel tax* e relativi contributi obbligatori, si sono acuite nel marzo 2011 dopo la repentina escalation che ha portato, prima alla decisione di chiudere immediatamente alcuni degli impianti più vecchi, e successivamente alla totale eliminazione del nucleare entro il 2022. Le critiche dei privati alle decisioni governative vertono sia sulle nuove tasse introdotte ma anche sui mancati profitti per il futuro a seguito dell'anticipata chiusura degli impianti, non giustificata da evidenze in termini sicurezza ma semplicemente da una presa di posizione governativa.
Queste decisioni politiche si scontrano però con le caratteristiche fisiche della rete di produzione elettrica tedesca. Si deve infatti tenere in considerazione che, nonostante la Germania si stia orientando con successo verso una produzione di elettricità diversificata per fonte, il venir meno dell'apporto del nucleare avrà delle ripercussioni. Questo tema è esposto da un ente governativo, la Bundesnetzagentur, l'Agenzia Federale Tedesca per le Reti Elettriche, gas, telecomunicazioni e ferrovie. Nella conferenza stampa del 27 maggio 2011[12], già si delineano le preoccupazioni esposte nel successivo report "*Status report on grid-based energy supply in Winter 2011/2012*", nel quale vengono menzionate criticità per quanto riguarda le scorte energetiche disponibili a seguito di un guasto in uno degli impianti nucleari tedeschi. In quest'ultimo documento, vengono enfatizzati i timori legati alle previste cessazioni di una parte degli impianti localizzati nel sud del paese, affermando che ciò avrebbe rilevanti ripercussioni sui livelli di sicurezza del sistema elettrico. Dal comunicato stampa[13], a pagina 3, si legge infatti:

> *"the announced shutdown of power plants, in particular in Southern Germany, is a major concern, as this would lead to an unacceptable drop in security levels".*

[12] Bundesnetzagentur, *Update of Bundesnetzagentur report on the impact of nuclear power moratorium on the trasmission networks and security of supply*, testo della conferenza stampa del 27 maggio 2011, Bonn, Bundesnetzagentur, 2011
[13] Bundesnetzagentur, *Press Release: Bundesnetzagentur publishes report on the situation in the electricity grid in winter 2011/2012*, comunicato stampa del 7 maggio 2012, Bonn, Bundesnetzagentur, 2012

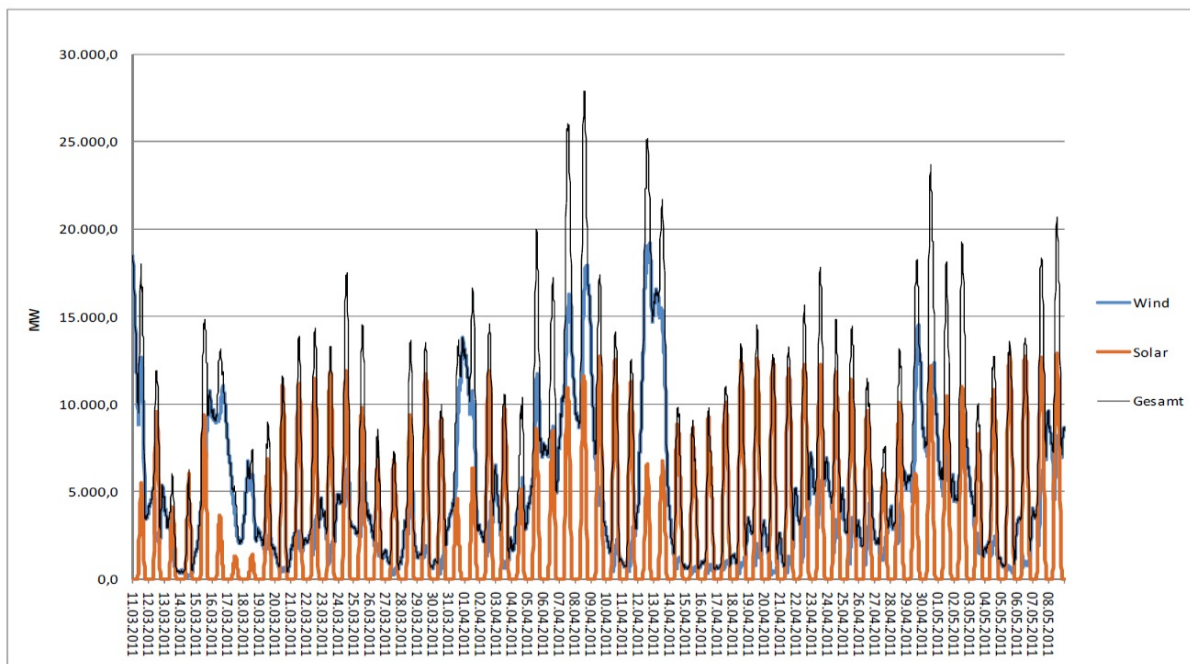
Riprendendo il documento del 27 maggio, si afferma in modo chiaro come la decisione di cessare le operazioni negli impianti nucleari, presenti un impatto rilevante sulla possibilità di garantire la stabilità nella fornitura di energia elettrica:

> da pag. 1: *"The historically simultaneous shutdowns of power plants amounting to 5000MW capacity and the long term lack of some 8500MW capacity bring the transmission grids to the edge of their resilience".*

Il report continua fissando alcuni punti focali derivanti dalle analisi effettuate:

> da pag. 3: *"…renewable energy source already have an enormous potential to cover load. At maximum, solar and wind reach up to 28GW,…leading to a manageable network situation The charts, however, also clarify that this capacity is not available in a reliable manner, but regularly disappears completely".*

Il grafico a cui si fa riferimento è quello riportato nel ***Grafico 8.***

GRAFICO 8. CONTRIBUTO DELLE FONTI RINNOVABILI ALLA PRODUZIONE ELETTRICA (GERMANIA, PRIMAVERA 2011)

Fonte: Bundesnetzagentur, *Update of Bundesnetzagentur report on the impact of nuclear power moratorium on the trasmission networks and security of supply*, testo della conferenza stampa del 27 maggio 2011, Bonn, Bundesnetzagentur, 2011, 3.

Come si può notare la potenza prodotta da rinnovabili è rilevante, ma è caratterizzata da un andamento molto altalenante. Ciò palesa l'importanza di fonti energetiche non dipendenti da fattori atmosferici per garantire il carico di base o *base load*, della rete ed evitare fenomeni come blackout che si ripercuoterebbero a catena su tutto il sistema, con rischi di un suo collasso.

Da pag. 6: "*In case of a permanent shutdown of the eight nuclear power plants affected by the moratorium, Germany can no longer support security of supply in the European interconnected grid to the extent it has done so far…"*

Ed ancora: *"… Bundesnetzagentur maintains that in critical load/generation situations … the level of security of supply in terms of generation is only just adequate. Security of supply in terms of generation can be maintained in Germany independently, i.e. without additional imports. This does not mean, however, that Germany will not become a net electricity importer on certain days or during certain weeks".*

Ecco quindi che il prevedibile impatto dello *shutdown* si ripercuoterebbe anche in termini di indipendenza energetica del paese, determinando una maggior esposizione alle oscillazioni dei prezzi dei combustibili fossili convenzionali, necessari a rimpiazzare il nucleare.

Un altro interrogativo che sorge è se la Germania abbia l'effettiva capacità di mettere in pratica la riduzione delle emissioni di gas serra come da accordi sottoscritti. Questo obiettivo dovrebbe essere raggiunto grazie ad un programma che prevede di raggiungere il 20% di energia prodotta da rinnovabili entro il 2020. Tutto ciò si scontra però con la necessità di soddisfare il fabbisogno elettrico con un numero sempre inferiore di centrali nucleari e con il corrispondente aumento delle rinnovabili, delle importazioni di elettricità dall'estero, ma anche con l'apertura di nuovi impianti a base di carbone. Quest'ultima scelta, benché comporti maggiori emissioni, viene compiuta sulla base della maggior profittabilità rispetto al gas[14]. Appare quindi evidente che il *phase-out* del nucleare tedesco debba avvenire in modo molto graduale senza ripetere quanto è avvenuto nella primavera 2011, pena l'instaurarsi di una situazione di precarietà nella fornitura di energia elettrica nel paese.

Come già accennato, è fuori discussione che la Germania stia compiendo grossi sforzi nelle rinnovabili, ne è la prova l'aumento di potenza solare installata del 34% nel 2012 rispetto all'anno precedente[15] , e che la quantità di elettricità prodotta dalla somma di solare, eolico ed idroelettrico, si avvicina quasi ad eguagliare l'energia prodotta dal nucleare, ma tutto ciò non sembra ancora sufficiente per garantire un costante *base load* con queste sole fonti. A conferma di quanto affermato, si rimanda al: ***Grafico 9*** e ***Grafico 10.*** Si nota come le fonti fossili rappresentano ancora la componente fondamentale della strategia energetica tedesca. Il fatto degno di attenzione poi, è l'importanza che riveste e ancor più rivestirà il carbone.

[14] World Nuclear Association, *Nuclear Power in Germany: Electricity from new coal-fired plants*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Germany/>, aggiornato novembre 2013.
[15] Bruno Burger, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 5

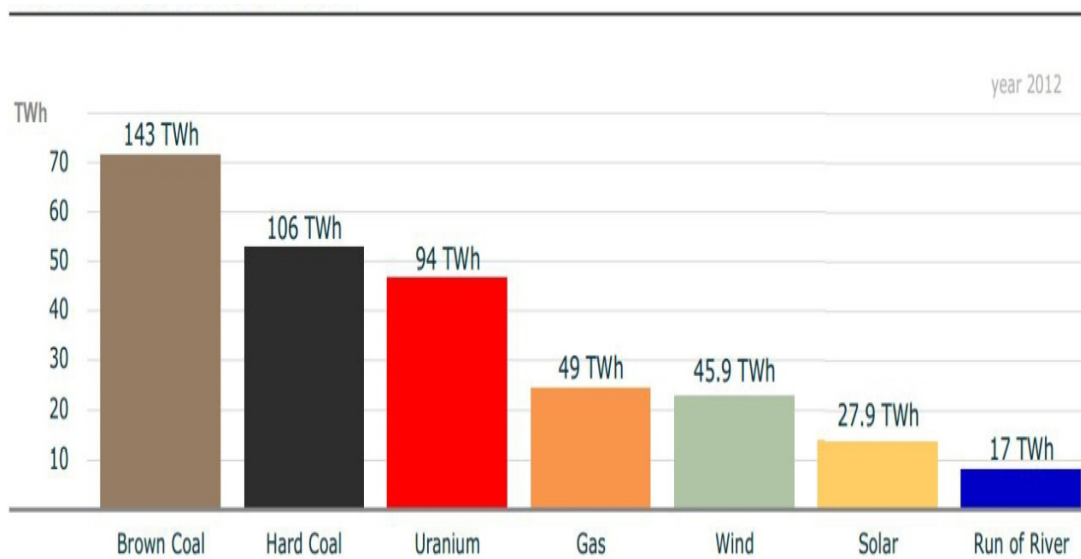
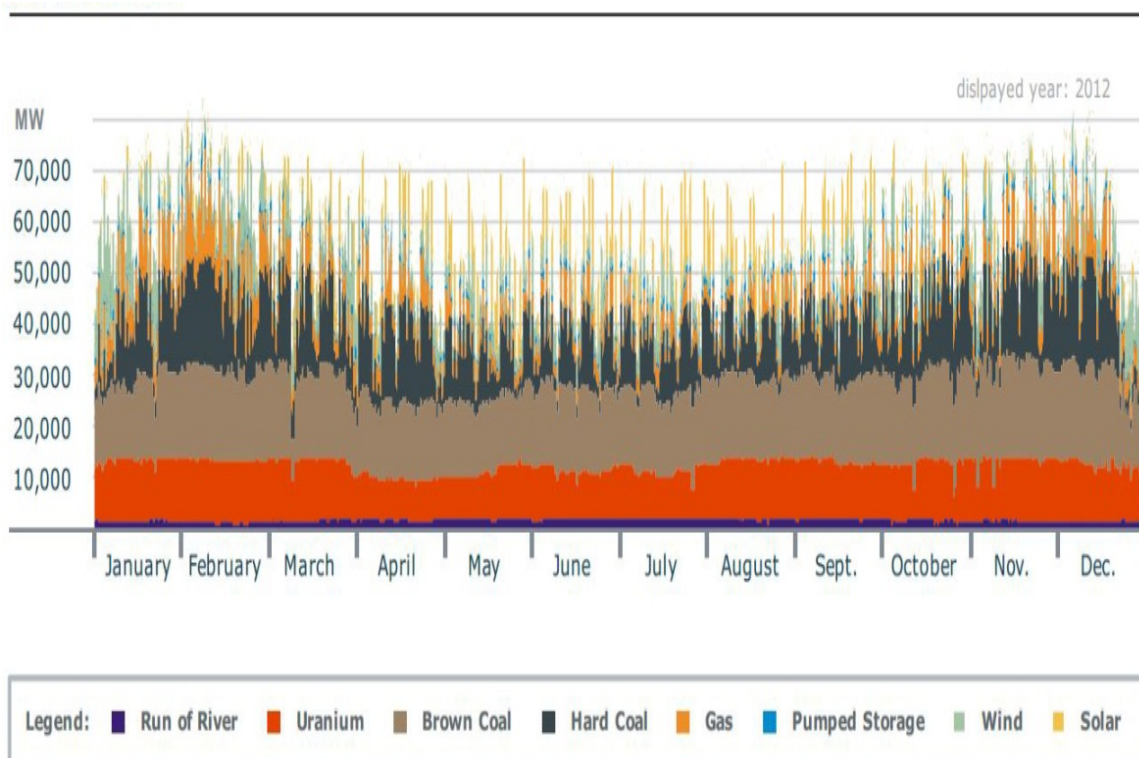
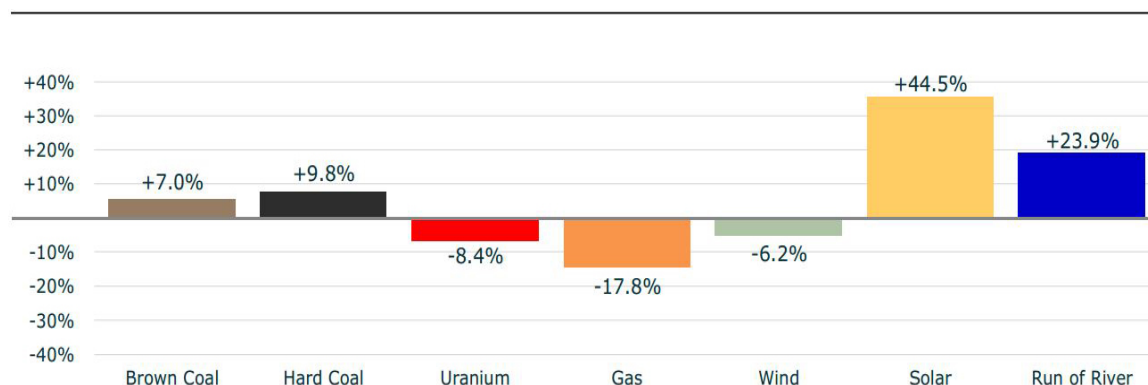
GRAFICO 9. CONTRIBUTO DELLE VARIE FONTI ALLA PRODUZIONE ELETTRICA (GERMANIA, 2012)

Fonte: Bruno Burger, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 8

GRAFICO 10. CONTRIBUTO ALLA PRODUZIONE ELETTRICA, PER FONTE, DURANTE L'ANNO (GERMANIA, 2012)

Fonte: Bruno Burger, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 43

Altre fonti meno inquinanti, ma meno profittabili, come il gas naturale, hanno fatto registrare invece una contrazione rilevante nel loro utilizzo. Si rileva quindi che, il minor apporto di

elettricità dal nucleare, a seguito dello spegnimento delle otto centrali, nel 2011, sia stato semplicemente compensato da un maggior sfruttamento di fonti fossili produttrici di gas serra, (***Grafico 11).***

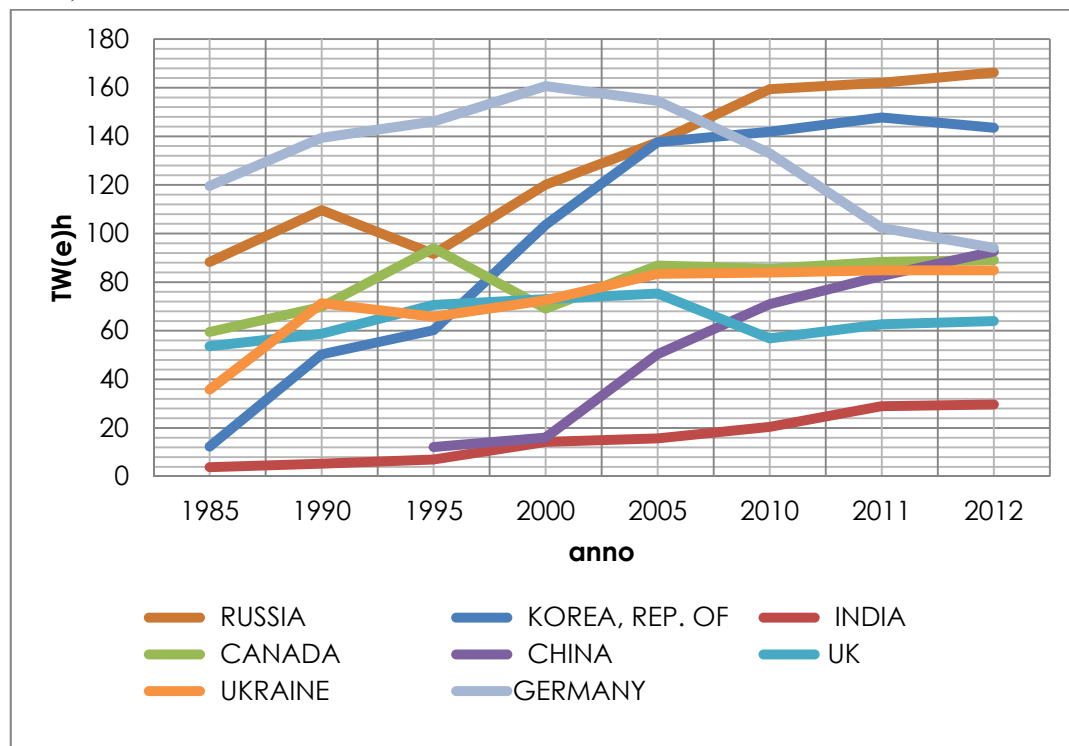
GRAFICO 11. VARIAZIONE PERCENTUALE NELLO SFRUTTAMENTO DELLE FONTI ENERGETICHE PER LA PRODUZIONE ELETTRICA, TRA L'ANNO 2011 ED IL 2012

+40%
+30%
+20%
+10%
-10%
-20%
-30%
-40%

Brown Coal	Hard Coal	Uranium	Gas	Wind	Solar	Run of River
+7.0%	+9.8%	-8.4%	-17.8%	-6.2%	+44.5%	+23.9%

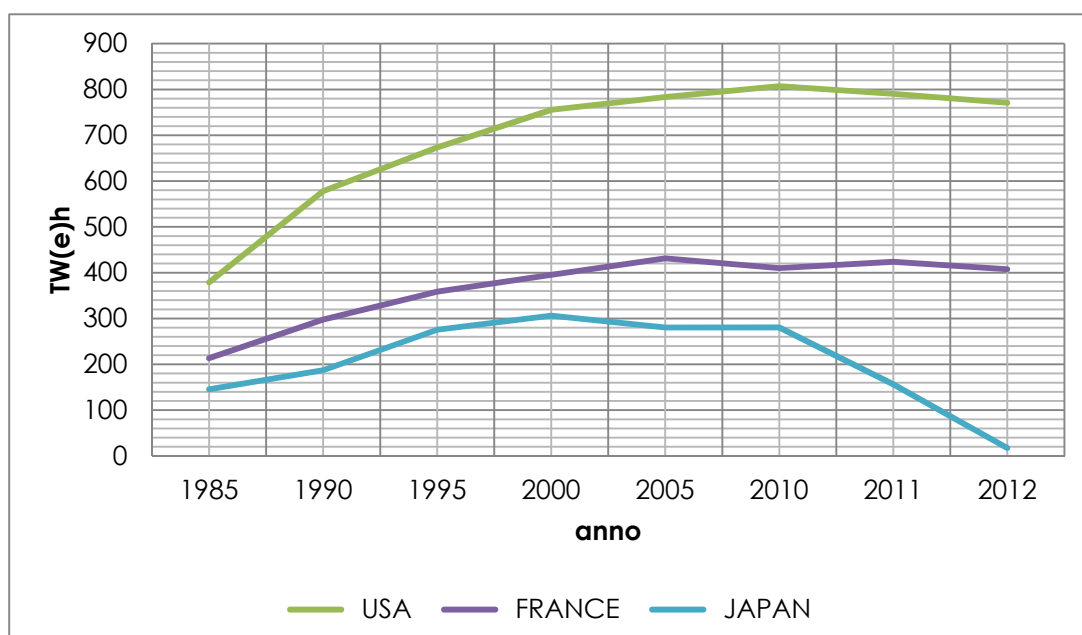
Fonte: Bruno Burger, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 9

In conclusione, la rinuncia, anche da parte di un paese economicamente avanzato, alla produzione nucleare, risulta una scelta ricca di criticità, ed è attuabile solo con molta gradualità, senza che vi siano concrete garanzie di riuscire nell'impresa, se non aumentando considerevolmente lo sfruttamento di altre fonti fossili convenzionali.

Ricollegandoci alla trattazione precedentemente interrotta, si andrà ad analizzare l'andamento della produzione di energia elettronucleare nel mondo dall'85 al 2012, per i paesi con almeno 15 reattori connessi attualmente alla rete. A questo scopo, vengono qui presentati due grafici distinti, per una maggior leggibilità, dato il divario tra l'entità della produzione del primo gruppo di paesi e gli altri, rispettivamente il: ***Grafico 12*** ed il ***Grafico 13.***
I grafici, presentano un contesto caratterizzato da paesi con un tasso costante di crescita, come India e Cina. Gli Usa, in crescita fino al 2010 si mantengono stabili, come si può dire per la Francia. La Russia ha accusato una contrazione dopo l'85, a seguito dell'incidente di Chernobyl, e la successiva disgregazione dell'URSS, ma dal 1995 ha ripreso a crescere stabilmente. Ma la performance più interessante è quella della Corea del Sud, che ha decuplicato la sua produzione annua sul periodo.

GRAFICO 12. ANDAMENTO PRODUZIONE ELETTRICA DA NUCLEARE (PRIMO GRUPPO DI PAESI)

Fonte: elaborazione dell'autore da dati da: International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 18,19

Canada ed Ucraina presentano tassi di crescita positivi ma contenuti. Il Regno Unito si mantiene costante dopo un calo tra il 2005 ed il 2010. Nel grafico sono stati inseriti anche i dati relativi alla Germania per mostrare il percorso in controtendenza che sta seguendo.

GRAFICO 13. ANDAMENTO PRODUZIONE ELETTRICA DA NUCLEARE (MAGGIORI PRODUTTORI)

Fonte: elaborazione dell'autore da dati da: International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 18,19

GIAPPONE

Si deve premettere che la produzione non ha subito un graduale declino come sembra dal ***Grafico 13***, bensì un drastico ed improvviso crollo a seguito dello standby dei reattori in conseguenza dell'incidente di Dai-ichi. Avanzare ora ipotesi comunque, sulla futura politica energetica, se o meglio in che misura sarà basata sul nucleare, è prematuro, quello che si può rilevare è il fenomeno, già avvenuto per gli incidenti di Three Miles Island e ancora più, con quello di Chernobyl, di un'improvvisa ostilità, giustificabile, nei confronti del nucleare da parte dell'opinione pubblica[16], che spinge le autorità all'abbandono dell'atomo per generare elettricità. Ciò si è però nuovamente scontrato con la necessità di disporre di energia a prezzi contenuti, da parte delle imprese giapponesi. Questo, insieme al cambio di schieramento politico del partito al governo, ha portato a rivedere la scelta del disimpegno, in favore di un prolungamento della vita produttiva degli impianti in standby, a seguito comunque di certificazioni di sicurezza rilasciate dopo controlli approfonditi. Questa nuova rotta, risulta decisamente giustificata, alla luce degli ultimi risultati in termini di bilancia dei pagamenti del paese asiatico. Infatti, anche considerato il contributo in termini di distruzione del terremoto e conseguente maremoto di Tohoku del 2011, nonché le congiuntura globale sfavorevole, l'aumento del deficit nella bilancia dei pagamenti, quasi raddoppiato rispetto al 2011, è da ricercarsi nel costo dell'energia importata al fine di compensare quanto non disponibile dalla produzione nucleare interna. Se a ciò si aggiungono le politiche di svalutazione attuate dalla Banca Centrale del Giappone, al fine di far crescere i volumi delle esportazioni e incentivare gli investimenti, si può affermare che la dipendenza del paese dall'importazione di combustibili fossili convenzionali[17], getta delle ombre sulla capacità a lungo termine di finanziare il debito pubblico, che già è uno dei più elevati al mondo.

Nonostante queste considerazioni, e il consenso accordato alle scelte dell"Abenomics", i giapponesi si mostrano ancora cauti in merito alla riattivazioni delle centrali. Secondo I sondaggi, seppur una percentuale prossima al 70%[18] accordi il consenso al premier, una simile percentuale invocherebbe un'uscita graduale dall'atomo[19]. Un ultimo punto da evidenziare, risiede anche nel divergente atteggiamento, da un lato da parte delle amministrazioni regionali, che spingono per la riattivazione degli impianti, cosa che garantirebbe loro

---

[16] The Economist, *Don't look now: A series of mishaps comes at an awkward time for the government*, The Economist, <http://www.economist.com/news/asia/21576450-series-mishaps-comes-awkward-time-government-dont-look-now>, 20 aprile 2013.

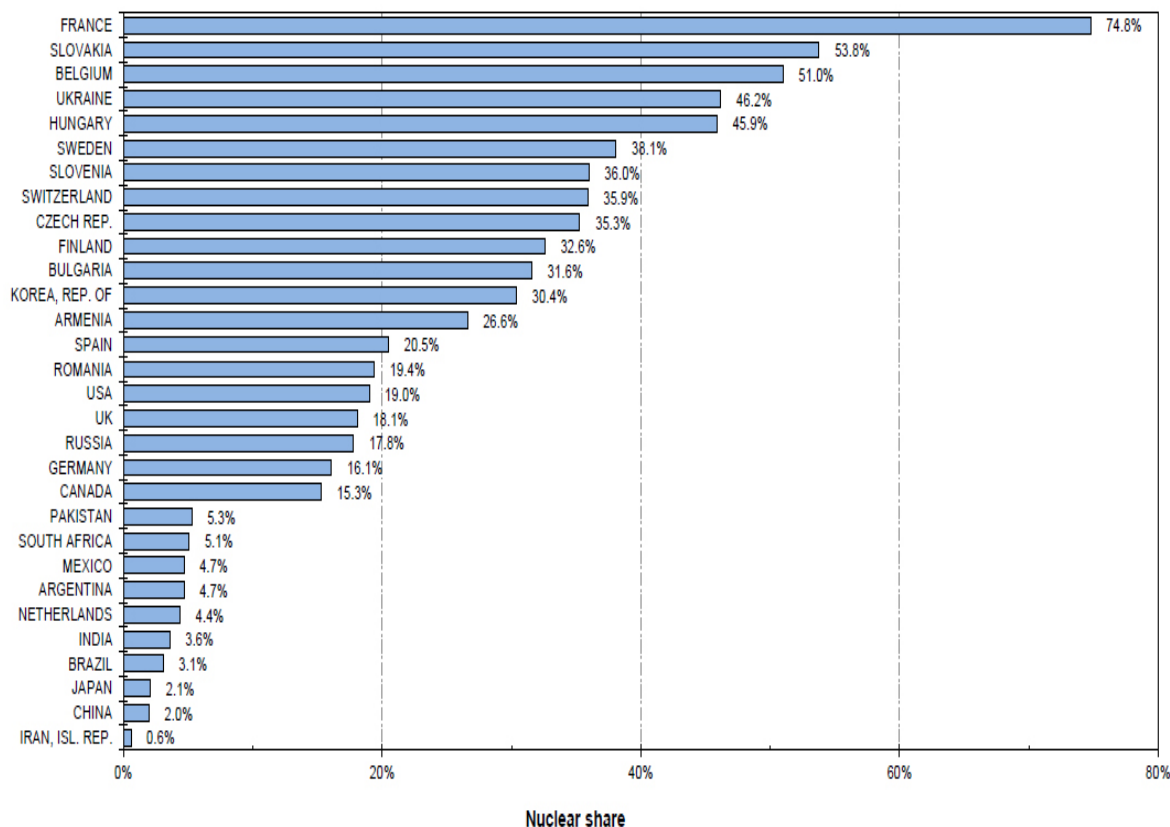
[17] Mitsuru Obe, *Japan posts trade deficit for record 15th month*, The Wall Street Journal, <http://blogs.wsj.com/economics/2013/10/21/japan-posts-trade-deficit-for-record-15th-month/>, 21 ottobre 2013.

[18] Martin Fackler, *Japan new leader takes on old order to jolt economy*, The New York Times, <http://www.nytimes.com/2013/03/07/world/asia/shinzo-abe-shakes-up-japan-in-effort-to-stir-its-economy.html?pagewanted=all&_r=0>, 6 marzo 2013.

[19] Nassrine Azimi, *When nature is not enough*, The New York Times, <http://www.nytimes.com/2013/05/08/opinion/global/Japans-Shift-From-Nuclear-Energy.html?pagewanted=all>, 7 maggio 2013.

maggiori entrate a seguito dei contributi concessi, derivanti dalla localizzazione degli impianti sui loro territori, dall'altro, la forte opposizione a livello locale ed individuale dei cittadini, per le preoccupazioni di eventuali futuri altri incidenti ed in generale, per la propria salute.
Le azioni da intraprendere, richiedono la lungimiranza di fissare sin d'ora le linee guida della futura strategia energetica, che tenga conto delle legittime istanze della popolazione, ma che nel contempo, siano sufficientemente razionali ed attuabili, e non creino situazioni di "emergenza" che costringano a correre ai ripari con soluzioni poco efficaci ed economicamente insostenibili nel lungo periodo.

Finora si sono viste le differenze tra i vari paesi in termini di numero di reattori, potenza ed output immesso in rete. Per avere un quadro più completo è opportuno però introdurre il concetto di *nuclear share*. Questo termine rappresenta l'apporto dell'energia nucleare sul totale della produzione di elettricità, offrendo un'importante informazione riguardo alla politica energetica di un paese.
Si può notare che paesi come: Slovacchia, Belgio, Ucraina ed Ungheria, si affidino al nucleare per la produzione, in media, di quasi il 50% dell'elettricità, (***Grafico 14).***

GRAFICO 14. NUCLEAR SHARE

Fonte: International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 76

FRANCIA

Il caso della Francia risulta poi emblematico, stabilendosi come paese al mondo che più si affida alla fissione. Una simile concezione dell'infrastruttura energetica, permette al paese di essere anche un esportatore netto di elettricità verso altri stati europei, grazie al contenuto costo di generazione della stessa. Utilizzando gli ultimi dati disponibili[20], risulta come a fronte di importazioni per 27,5TW(h), le esportazioni raggiungano 83TW(h), con un surplus di 55,5TW(h).

Il programma nucleare civile francese entra nel vivo durante gli anni '50, in particolare con la creazione di due entità governative: la CEA, *Commissariat a l'Energie Atomique*, con scopi di supervisione alla ricerca civile e militare, e l'EDF *Electricite de France*, per la gestione della generazione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica in posizione di monopolio. L'obiettivo francese era quello di garantire l'indipendenza energetica del paese, un fattore considerato essenziale da tutti i politici transalpini fin dalla Prima Guerra Mondiale, soprattutto in considerazione della scarsa disponibilità di risorse naturali presenti sul territorio. Inoltre si stava assistendo ad un sempre maggior fabbisogno elettrico a seguito della diffusione di condizioni di maggior benessere dopo le distruzioni causate della Seconda Guerra Mondiale. La Francia inoltre necessitava per risollevarsi, di ricostruire la propria infrastruttura industriale, e ciò presupponeva il poter disporre di energia, anche elettrica.

Considerazioni politiche ritennero che la via dell'arricchimento dell'uranio non fosse praticabile a seguito delle inadeguate conoscenze industriali nel campo, e degli elevati capitali richiesti. L'unica via percorribile implicava quindi l'utilizzo di uranio naturale, e l'interesse si concentrò su reattori di tecnologia LMFBR, soprattutto in un'ottica di lungo periodo. Successivi studi, e lo sviluppo nello stesso periodo del corrispettivo inglese Magnox, portarono al concretizzarsi della serie UNGG[21], della quale il primo reattore raggiungerà la criticità nel 1956, ed altri seguiranno negli anni successivi[22]. Nel 1969, le mutate condizioni e l'evoluzione della tecnologia, unite ad un incidente rilevante in una centrale francese (impianto di Saint-Laurent, incidente classificato INES-4, 17 ottobre 1969), fanno propendere per l'adozione della filiera americana PWR per le future centrali in programma, anche in considerazione del costo, considerato il parametro centrale nelle decisioni da prendere, da parte dei vertici politici, scelta che diverrà definitiva nel 1975.

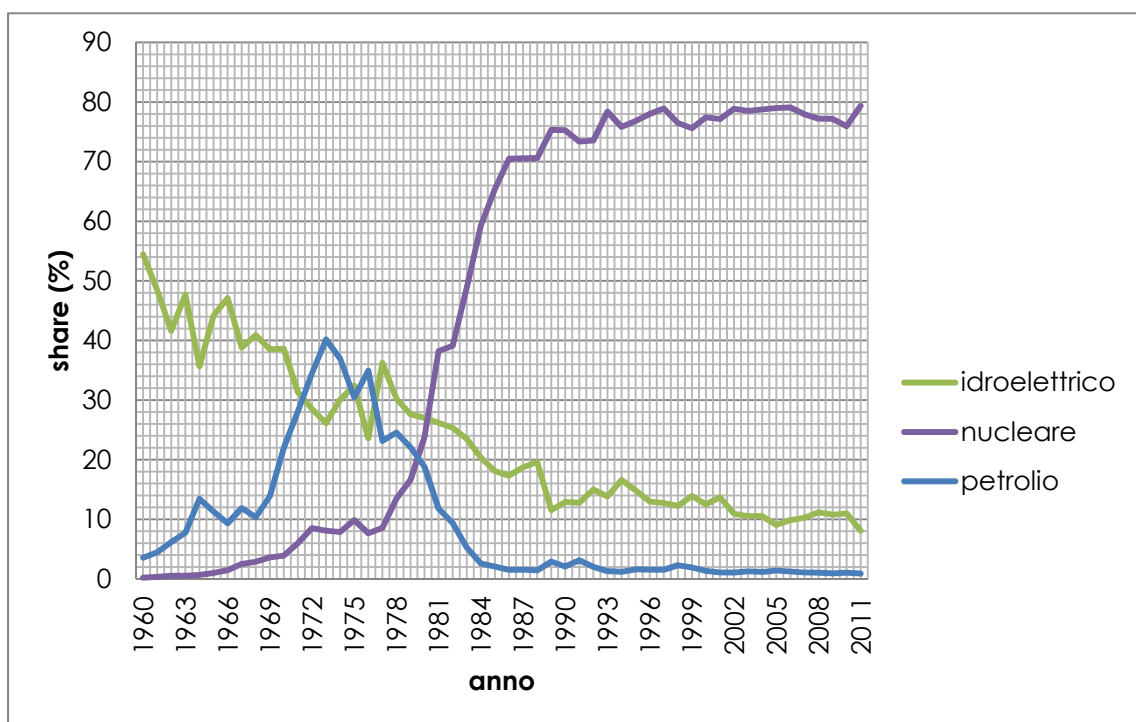
[20] Réseau de transport d'électricité, *Annual Import/Export balance: Contractual cross-border exchanges in 2007*, <http://clients.rte-france.com/lang/an/visiteurs/vie/bilan_annu.jsp>, 2007.
[21] Christian Nadal, *History of Nuclear Energy in France*, <http://alsosconceptmap.wlu.edu/nuclearpower/main/LinkedDocuments/2007-06-22-HISTORY%20OF%20NUCLEAR%20ENERGY-EDFINA.ppt>, 22 giugno 2007..
[22] Christian Nadal, *History of Nuclear Energy in France*, <http://alsosconceptmap.wlu.edu/nuclearpower/main/LinkedDocuments/2007-06-22-HISTORY%20OF%20NUCLEAR%20ENERGY-EDFINA.ppt>, 22 giugno 2007.

Nel 1973 la nuclear share francese è ancora limitata all'8% ed il maggior contributo proviene ancora dall'idroelettrico e dal petrolio.

Il punto di svolta si registra proprio nel '73[23], a seguito della Crisi Petrolifera, che dà impulso a mettere in cantiere un ampio progetto di impianti atomici che confluiranno nel piano Messmer, reso pubblico nel marzo del 1974, che traeva il suo nome dal primo ministro del tempo, e che si poneva l'obbiettivo di realizzare 13 reattori da 1000MW(e) ciascuno, entro due anni[24]. Questo piano, seguiva di pochi mesi quello annunciato da Nixon, nel novembre del 1973, che prevedeva:

> *"that by 1980, under Project Independence, [they] shall be able to meet America's energy needs from America's own energy resources…[reducing] the time required to bring nuclear plants on line"*[25].

Già nel 1974 si dà inizio alla costruzione di 3 impianti, per una potenza totale di 11GW(e), ed entro il 1977 iniziano i lavori in ulteriori 5 installazioni, per un ulteriore potenza di 13GW(e). I risultati del piano Messmer sono sintetizzati nel ***Grafico 15*** , che mostra anche il graduale declino nella rilevanza di idroelettrico e petrolio sulla produzione elettrica totale.

GRAFICO 15. EVOLUZIONE DELLA NUCLEAR SHARE IN FRANCIA

Fonte: eleborazione dell'autore da dati da: Index Mundi,*Electricity production from oil sources (% of total)*, <http://www.indexmundi.com/facts/france/electricity-production-from-oil-sources>; *Electricity production from nuclear sources (% of total)*, <http://www.indexmundi.com/facts/france/electricity-production-from-nuclear-source>s; *Electricity production from hydroelectric sources (% of total)*, <http://www.indexmundi.com/facts/france/electricity-production-from-hydroelectric-sources>, 2012.

[23] Jon Palfreman, *Why French like nuclear energy*, PBS, <http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/readings/french.html>, s.d.

[24] Electricité De France, *The growth of civil nuclear in France*, <http://about-us.edf.com/profile/history/1974-1989-43673.html>, 2013.

[25] Rosemary Klapac, *Two Roads Diverge, and France Took the One Less Traveled: The divergence of nuclear policy in France and the United States*, Research Paper, University of Maryland, 2010, 7.

Alla fine del 1995, la capacità nucleare della Francia era superiore a quella di Germania, Regno Unito, Spagna e Svezia insieme[26]. Ancora qualche anno più tardi, nel 1999, il Parlamento Francese riaffermava i tre pilastri[27] su cui la politica energetica del paese si regge, grazie all'atomo:

- sicurezza delle forniture di energia
- rispetto dell'ambiente
- corretta gestione delle scorie radioattive

Il nucleare in Francia, dopo trent'anni, risulta ancora la fonte di energia elettrica preferita, anche considerando che il gas è soggetto a forte volatilità nel prezzo, relegandolo a fonte economicamente svantaggiosa per assicurare il *base load*, mentre le rinnovabili non sembrano in grado di garantirlo, almeno nel prossimo futuro. In un'ottica storica, la ragione del successo del programma nucleare francese è da considerarsi in gran parte politica. I fattori di questo successo devono quindi essere ricondotti ad un forte controllo governativo, che è stato in grado di prendere decisioni chiare, riuscendo a raggiungere le tappe prefissate nei tempi previsti, ma anche ad un grande sostegno da parte dei francesi, benché sia sempre esistito uno zoccolo duro di opposizione all'atomo. La seconda ragione è di tipo tecnico. Dopo la fase di introduzione della tecnologia del paese, che ha visto la costruzione di impianti con un basso tasso di standardizzazione, quest'ultima è stata posta al centro del programma francese, permettendo via via di ottimizzare e ridurre i costi di progettazione e di costruzione, ma anche il tempo stesso necessario a quest'ultima, nonché alle operazioni di manutenzione, ed al contempo innalzare il grado di sicurezza degli impianti[28].

E' solo nel 2012, che l'elezione del nuovo presidente Hollande, fa nascere un dibattito nazionale in merito ad un progetto di transizione energetica, che punterebbe a ridurre al 50% il contributo dell'energia nucleare alla produzione elettrica, in favore delle rinnovabili, le quali attualmente partecipano per quasi il 15% del totale, in aggiunta al 10% di fonti fossili, (***Grafico 16).***

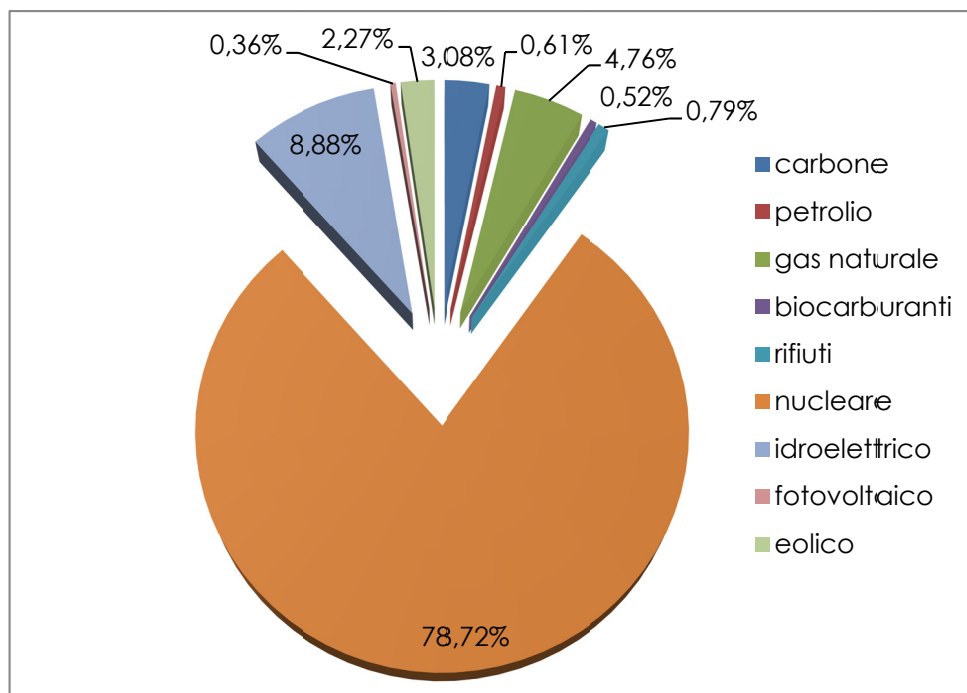
Le conclusioni di questo dibattito sono state rese note nel settembre 2013, attraverso un documento che sintetizza le conclusioni a cui è pervenuto[29].

[26] International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 16

[27] World Nuclear Association, *Nuclear power in France: Recent energy policy,* <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/France/>, aggiornato dicembre 2013.

[28] Christian Nadal, *History of Nuclear Energy in France*, <http://alsosconceptmap.wlu.edu/nuclearpower/main/LinkedDocuments/2007-06-22-HISTORY%20OF%20NUCLEAR%20ENERGY-EDFINA.ppt>, 22 giugno 2007.

[29] Secrétariat Gènèràl du dèbat national sur la transition ènergètique, *Synthèse nationale des dèbats territoriaux*, <http://www.transition-energetique.gouv.fr/sites/default/files/dnte_synthese_nationale_des_debats_territoriaux.pdf>, settembre 2013.

GRAFICO 16. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (FRANCIA, 2011)

Fonte: International Energy Agency, *France: Electricity and Heat for 2011*, <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=FRANCE&product=electricityandheat&year=2011>, s.d. [2012?].

Da ciò che si evince, in tema di nucleare il dibattito resta acceso, e si sottolinea una richiesta di maggior trasparenza del settore al fine di dare la possibilità ai cittadini di formarsi una propria opinione in merito. Sintetizzando si possono comunque isolare due gruppi: il primo, preoccupato dei rischi per la salute, la gestione delle scorie ed i costi di funzionamento e di decommissioning, il secondo, che sottolinea i vantaggi in termini di basso costo dell'elettricità, e delle ridotte emissioni di CO_2, ma solleva preoccupazioni legate alla necessità di rinnovare gli impianti quando questi giungeranno alla loro fine operativa.

Al fine di fornire una misura quantitativa, è utile confrontare opinioni rilevate con i risultati di un recente sondaggio[30]. Il 36% degli intervistati si dicevano favorevoli all'uso del nucleare, mentre il 14% erano contrari. Nel settembre 2013, un altro report, questa volta a firma di una commissione scientifica di parlamentari francesi, l' *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*[31], sottolineava i rischi per la Francia, di essere esposta a forti pressioni del mercato dell'energia, in caso intenda perseguire una rapida riduzione della capacità elettronucleare. Sintetizzando si può affermare che la volontà dell'attuale governo si scontra con l'opposizione delle commissioni scientifiche, in un contesto in cui la popolazione non ha una netta opinione sul ruolo futuro del nucleare.

[30] Alan Katz, *French support for nuclear power rises ahead of law*, poll shows, Bloomberg, <http://www.bloomberg.com/news/2013-06-22/french-support-for-nuclear-power-rises-ahead-of-law-poll-shows.html>, 22 giugno 2013.
[31] World Nuclear Association, *Nuclear power in France: Recent energy policy*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/France/>, aggiornato dicembre 2013.

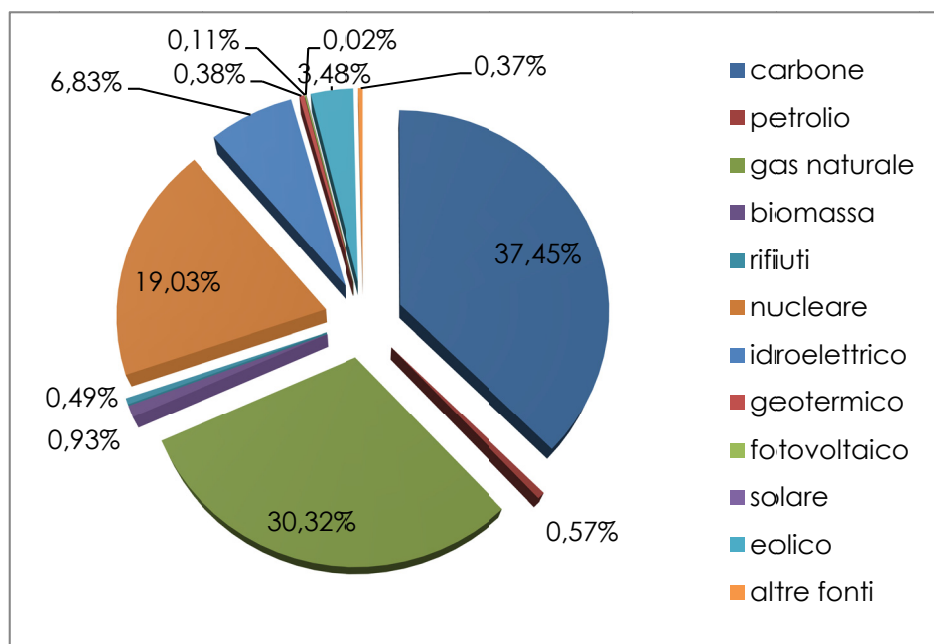
Quello che invece è certo è che sul suolo francese è in fase di avanzata costruzione una delle due centrali, insieme a quella finlandese di Olkiluoto, di tipo EPR, *European Pressurised-water Reator*, da 1650MW(e) per reattore, che dovrebbe iniziare ad operare nel 2016, nel periodo in cui è prevista la chiusura dell'impianto di Fessenheim, antiquato ma che ha appena ricevuto le certificazioni per l'allungamento dell'operatività, che verrà spento per decisione politica.

In conclusione, nonostante il crescente dibattito da parte di mondo politico ed opinione pubblica, la ricerca francese è al lavoro su reattori di quarta generazione di tipo FBR, potendo inoltre sfruttare a questo fine, le passate esperienze nei progetti Phenix ed Superphenix. Vi sono prospettive di giungere a prototipi operativi già nel 2020, mentre design commerciali sono previsti per il 2035/40.

La decisione di ridurre il peso del nucleare avrebbe sicuramente ripercussioni sia sul comparto della ricerca ma anche sull'industria atomica francese, apprezzata all'estero per le sue soluzioni, che conta già tra i suoi clienti: Iran, Sud Africa, Corea del Sud e Cina.

USA

L'analisi della nuclear share statunitense, che si attesta a "solo" il 19% sul totale, permette di comprendere che, negli USA, il combustibile tuttora più utilizzato nella produzione elettrica resta il carbone, come appare ancora più immediato dal ***Grafico 17.***

GRAFICO 17. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (USA, 2012)

Fonte: U.S. Energy Information Administration, *Table 7.2a Electricity Net Generation: Total (All Sectors) (Sum of Tables 7.2b and 7.2c; Million Kilowatthours)*, <http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec7_5.pdf>, aggiornato 20 dicembre 2013.

Ciò si spiega con l'entità delle riserve del paese, le più abbondanti al mondo per carbone recuperabile[32], e che fa si che quest'ultimo sia una fonte economicamente vantaggiosa, anche se la concorrenza del gas naturale è rilevante. L'altra faccia della medaglia, è costituita dalle emissioni di gas serra dalla sua combustione, che concorrono per il 31% del totale nazionale dopo il 43% del petrolio, ma che ingloba anche la componente derivante dall'autotrazione .

La nuclear share, ha sempre oscillato attorno all'attuale valore fin dal 1990, ma la produzione nucleare ha registrato una costante crescita, per soddisfare il crescente fabbisogno energetico. Ciò è stato reso possibile sia da nuovi reattori posti in servizio, 34 unità dall'85, all'ultimo, nel 1996, ma anche grazie ad un maggior sfruttamento degli esistenti, grazie a migliorie tecniche e nuove procedure[33].

Negli anni 2000, un reattore è stato riavviato, la costruzione è ripresa in un altro sito, ed in altri due impianti, la cui costruzione è sospesa, vi sono prospettive per un riavvio nei lavori.

Gli ultimi segnali che negli USA si stia assistendo ad una ripresa sul fronte dell'energia atomica, è stata l'approvazione da parte della NRC, *Nuclear Regulatory Commission*, l'autorità di controllo statunitense, datata 9 febbraio 2012, in cui viene rilasciata la concessione per la costruzione di 2 reattori di terza generazione (+). L'ultima autorizzazione portava la data del 1978. La costruzione delle unità è già iniziata. Quasi contemporaneamente, nel marzo 2012, è stata approvata la realizzazione di altri due reattori AP1000, ed anch'essi sono già in costruzione. A questi due casi si devono sommare altre 28 unità che sono in attesa di autorizzazione, ed una percentuale rilevante delle quali saranno operative entro il 2040, se si considera che le stime prevedono nuova potenza nucleare disponibile pari a 19GW(e) per quell'anno. Il numero di 28 reattori in fase di verifica poi, non deve stupire, considerando che il processo di autorizzazione è molto complesso e particolareggiato, comprendo un tempo che va dai 30 ai 60 mesi[34]. Vi è altresì da considerare che la NRC, nella sua storia, ha rifiutato il rilascio della licenza per un solo impianto, ed è quindi prevedibile che, stante non sia l'utility a ritirarsi dalla procedura, tutti i richiedenti conseguiranno l'autorizzazione una volta completate le verifiche.

Parrebbe quindi esservi negli USA, nonostante le criticità legate al finanziamento degli impianti e i lunghi tempi di realizzazione, un certo interesse per l'atomo.

---

[32] United States Energy information Administration, *What is the Role of Coal in the United States*, <http://www.eia.gov/energy_in_brief/article/role_coal_us.cfm>, aggiornato 16 agosto 2013.
[33] United States Energy information Administration, *What is the status of the US nuclear industry*, <http://www.eia.gov/energy_in_brief/article/nuclear_industry.cfm>, aggiornato 14 dicembre 2012.
[34] United States National Regulatory Commission, *Frequently Asked Questions About License Applications for New Nuclear Power Reactors*, Office of New Reactors, 2009, 10

E' quindi a questo punto utile andare ad analizzare la posizione del governo statunitense in merito alla strategia energetica futura. Alcuni importanti elementi possono essere raccolti dal Discorso alla Nazione del 2012, nel quale, il presidente Obama ha affermato[35]:

> *"all-out, all of the above strategy that develops every available source of american energy – a strategy that's cleaner, cheaper and full of new jobs"*.

L'intenzione di puntare ad un migliore sfruttamento delle fonti statunitensi ha come obiettivo quello di ridurre la dipendenza dal petrolio estero, aumentando la produzione locale, già peraltro ai massimi da otto anni. Si deve comunque tenere in considerazione che, seppur consistenti, le riserve petrolifere USA misurano meno del 2% sul totale mondiale, e vi è quindi la necessità di diversificare attraverso altre fonti. In tema di energie pulite, gli USA hanno quasi raddoppiato il contributo da parte delle fonti rinnovabili, anche se esse coprono ancora una quota inferiore al 13% sul totale dell'energia elettrica prodotta e, più della metà, deriva dall'idroelettrico. Un rilevante contributo ad un'energia più pulita sembra quindi dovere derivare ancora da una fonte fossile, il gas naturale, che nel 2003 ha visto il livello di produzione più alto di sempre, grazie anche a nuovi metodi per l'estrazione nazionale che hanno inondato il mercato interno di gas a basso costo.

Nel medesimo Discorso citato, anche il nucleare viene menzionato nel seguente passaggio:

> *"…including renewable sources such as wind, solar, biomass, hydropower and nuclear, among others, with this requirement in place, clean sources would account for 80% of our electricity by 2025"*.

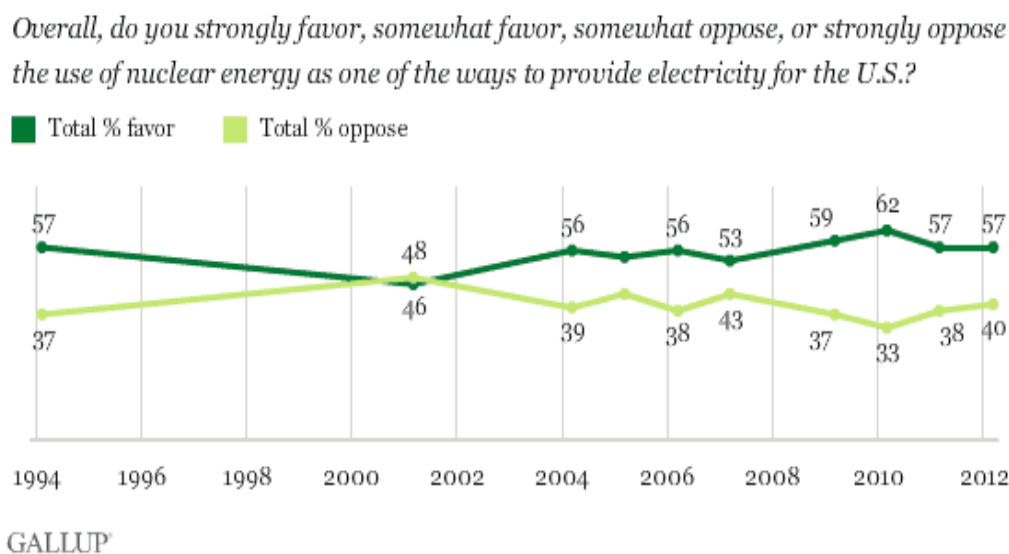
Si può quindi desumere che il nucleare avrà un ruolo da protagonista per il futuro, e potrà anche beneficiare degli incentivi fiscali e del supporto federale destinato alle energie pulite, dal momento che pare rientri in questa categoria. Queste considerazioni sono avvalorate dalle dichiarazioni[36] del Segretario per l'Energia statunitense che, proprio nei giorni della crisi giapponese, affermava:

> *"…the Atomic Administration continues to support the expansion of nuclear power in the United States, despite crisis in Japan"*.

Anche altre iniziative intraprese nel corso degli ultimi anni, sembrano far intravedere, se non una rinascita, almeno concrete prospettive di sviluppo. Già nel 2010 infatti, il presidente

[35] Megan Slack, *Everything You Need to Know: President Obama's Blueprint for American-Made Energy*, <http://www.whitehouse.gov/blog/2012/01/26/everything-you-need-know-president-obamas-blueprint-american-made-energy>, 26 gennaio 2012.
[36] Julieann Mckellogg, *US nuclear reinassance further crippled by Japan crisis*, Voice of America, <http://www.voanews.com/content/us-nuclear-renaissance-further-crippled-by-japan-crisis-118272249/169632.html>, 17 marzo 2011.

Obama, proponeva di triplicare i fondi per prestiti garantiti ai programmi nucleari, proposta che ha preceduto quella del 2012, per finanziare la ricerca su impianti di nuova generazione[37]. Infine, l'atteggiamento dell'opinione pubblica nei confronti del nucleare, sembra ancora in gran parte favorevole, anche dopo l'incidente di Dai-ichi, ed anzi quest'ultimo non sembra aver influenzato[38]. A sostegno di questo, si rimanda al ***Grafico 18*** che illustra la percentuale di favorevoli e contrari all'uso dell'energia nucleare negli USA da cui si può affermare che la maggioranza degli intervistati considerino gli impianti statunitensi sostanzialmente sicuri, e basandosi su questo assunto, supporterebbero la decisione di costruirne di nuovi nel futuro.

GRAFICO 18. PERCENTUALI DI FAVOREVOLI E CONTRARI ALL'UTILIZZO DELL'ENERGIA NUCLEARE PER LA GENERAZIONE ELETTRICA (USA, 1994-2012)

Fonte: Frank Newport, *Americans still favor nuclear power a year after Fukushima: Majority also still sees nuclear power as safe*, Gallup.com, <http://www.gallup.com/poll/153452/americans-favor-nuclear-power-year-fukushima.aspx>, 26 marzo 2012.

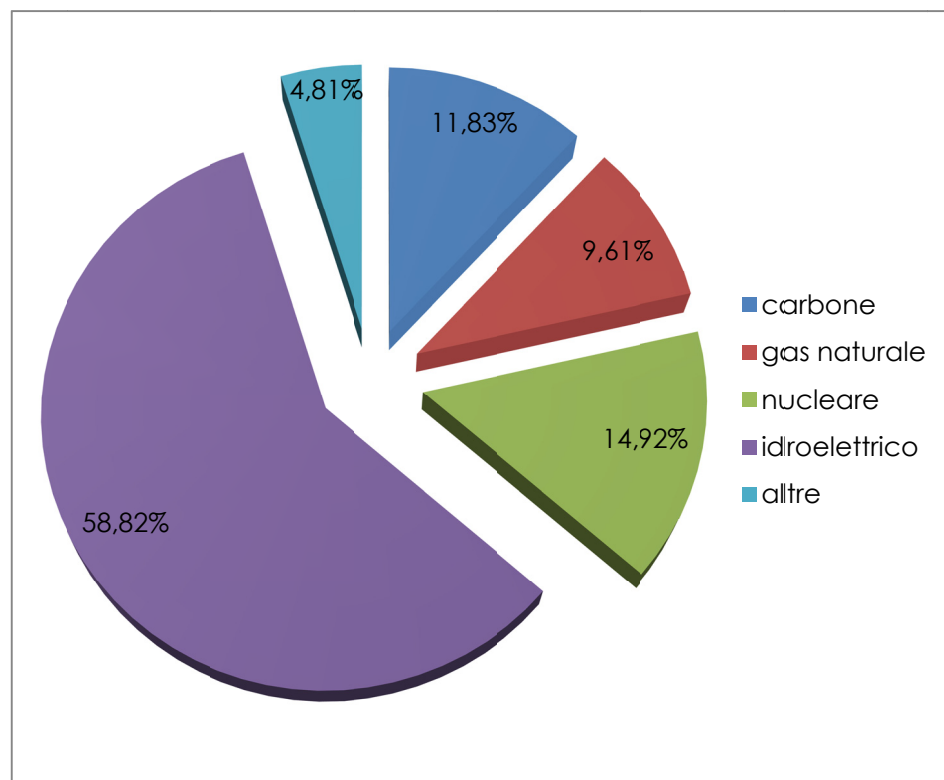
Rimanendo nel continente americano, è interessante andare ora ad analizzare la situazione del Canada.

CANADA

Il paese si affida per il 15,3% del totale prodotto all'energia elettronucleare. Ciò sembra in contrasto con la grande produzione annua di uranio, di cui il Canada è uno tra i principali produttori al mondo, ma non deve stupire, alla luce della rilevanza dell'idroelettrico, di cui il paese è grande produttore, ma anche della ricchezza di combustibili fossili presenti nel

[37] The Economist, *Nuclear Power: The 30-ear itch*, The Economist, <http://www.economist.com/node/21547803>, 18 febbraio 2012.
[38] Frank Newport, *Americans still favor nuclear power a year after Fukushima: Majority also still sees nuclear power as safe*, Gallup, <http://www.gallup.com/poll/153452/americans-favor-nuclear-power-year-fukushima.aspx>, 26 marzo 2012.

sottosuolo. Nonostante ciò, il paese è sia grande esportatore di energia che importatore, sia a causa della localizzazione dei suoi giacimenti, sia a causa dell'estensione del suo territorio.
Il contributo alla produzione di elettricità, fornito dalla varie fonti, è rappresentato nel ***Grafico 19.***

GRAFICO 19. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (CANADA, 2012)

Fonte: World Nuclear Association, *Nuclear Power in Canada*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/Canada--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013.

L'idroelettrico è quindi di gran lunga la fonte più sfruttata. A seguire, e con simili percentuali tra loro, troviamo invece nucleare e carbone. Una nota è doverosa sugli impatti dell'estrazione del carbone canadese sull' ambiente, anche considerando l'estensione dei territori, che costringe a costruire infrastrutture viarie estese, al fine di accedere ai giacimenti.
La rilevanza del gas è invece abbastanza contenuta, anche se il consumo domestico è aumentato in anni recenti, mentre le esportazioni verso gli USA sono diminuite.
Tra le rinnovabili, escluso l'idroelettrico, solo l'eolico, con valori variabili tra l'1% e l'1,5%, ha una quota modesta[39].
Per quanto riguarda il nucleare, il Canada è uno dei paesi che per primo ha condotto programmi di ricerca, iniziata già nel '42, e che ha permesso di giungere alla prima criticità

[39] International Energy Agency, *Canada: Electricity and Heat for 2011*, <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=CANADA&product=electricityandheat&year=2011>, s.d. [2012?].

già nel 1945. Gli sviluppi successivi porteranno ad implementare, nel '47, la concezione di un reattore ad uranio naturale ed acqua pesante. Una pietra miliare per l'industria civile canadese, sarà costituita poi dalla fondazione, nel 1952, dell'AECL, acronimo per *Atomic Energy of Canada Limited*, la società del governo canadese che giungerà, nei primi anni '60, a gettare le basi per la filiera CANDU.

Una delle caratteristiche salienti di questi reattori, è la possibilità di evitare di utilizzare grandi parti metalliche di fusione, utilizzando invece parti più piccole, successivamente assemblate assieme in loco per costituire il vessel, caratteristica che ha reso competitivo il progetto anche all'estero, in paesi non dotati di un'industria pesante così evoluta come quella dei paesi occidentali. Ciò ha permesso di realizzare una unità già nel 1963, in India, ed in seguito, la tecnologia è stata esportata anche in: Pakistan, Argentina, Romania, Corea del Sud ed Argentina.

Sul territorio candese, la dislocazione degli impianti, è molto concentrata, la maggioranza dei quali è costruita nella regione dell'Ontario, mentre gli altri due reattori operativi, dei 19 totali, si trovano in Quebec e New Brunswick. Questa disposizione riflette la vicinanza alle fonti energetiche dei vari territori. Per esempio, l'idroelettrico è molto diffuso nel paese, ma non nei territori dell'Alberta, che soddisfa il suo fabbisogno energetico principalmente con il carbone. Proprio l'Alberta, per le sue attività fortemente energivore, in particolare quelle di sfruttamento delle sabbie bituminose, sarebbe il candidato ideale per la costruzione di due nuovi reattori, anche tenendo in considerazione la progressiva obsolescenza del parco reattori del paese e la necessità di modernizzazione, ma, a fine 2013, il progetto risulta rinviato a causa della riduzione della domanda di energia attesa.

Come fatto per gli altri paesi in precedenza, si andrà ora ad analizzare l'atteggiamento di un campione di intervistati nei confronti dell'energia nucleare[40]. Considerando la popolazione nel suo complesso, il nucleare risulta la forma di produzione elettrica meno supportata, con il 37%, dopo il carbone, anche a causa dell'opinione, per il 63% degli intervistati, che questa forma sia considerata costosa. Ciò inoltre, è legato strettamente all'impatto del disastro di Fukushima, di cui i candesi risultano osservatori interessati, e convinti, come afferma il 62%, che l'evento giapponese, sia dovuto ad un problema sistemico dell'energia atomica, e di qui il conseguente timore che qualcosa di simile possa accadere anche in Canada.

Nel dettaglio, il supporto degli intervistati va maggiormente, per il 47%, alla manutenzione ed al riammodernamento degli impianti esistenti, e meno, 33%, alla costruzione di nuovi.

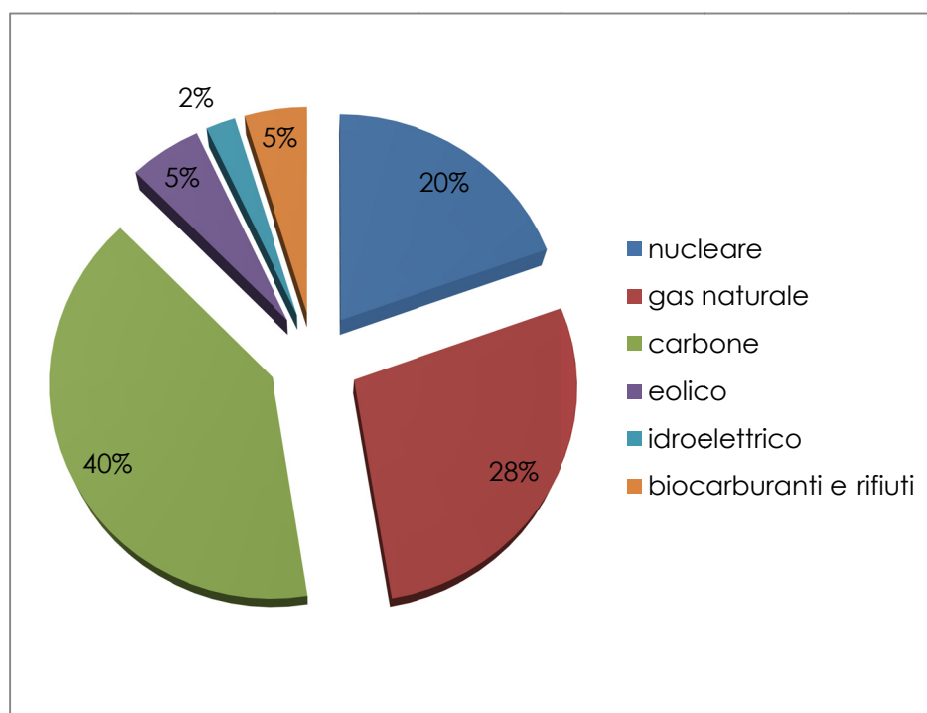
[40] Innovative Research Group Inc., *National Nuclear Attitude Survey*, Toronto,Canadian Nuclear Association, 2012, 3-4

In merito alla tecnologia invece, la maggioranza dei canadesi, ritiene che il nucleare abbia fatto importanti passi in avanti da quando è stato introdotto, ed altri ne farà nei prossimi 50 anni.
Quello che emerge dallo studio è anche una bassa conoscenza di tematiche basilari legate all'atomo, come quella della radioattività, con solo l'8% in grado di rispondere correttamente a due semplici domande vero/falso, in merito a questo argomento.
Le considerazioni fin qui effettuate, si basano sulle risposte di cittadini provenienti da tutte le regioni del Canada ma, va considerato che la maggioranza dei reattori sono localizzati in Ontario, e proprio in questa regione si registra la percentuale più elevata a favore della generazione nucleotermoelettrica. Il 54% di questi intervistati dichiara il suo supporto all'energia nucleare, e ben il 63% ritiene che l'ammodernamento delle centrali esistenti dovrebbe essere compiuto più rapidamente di quanto si stia verificando, soprattutto sulla base dei benefici economici, e sulla maggiore occupazione che si genererebbe. Una percentuale leggermente più bassa, il 48%, è inoltre favorevole alla costruzione di nuovi reattori.
In conclusione, la situazione appare ostile al nucleare, questo se si considera il paese nel suo complesso ma, considerando che il 30% della popolazione del Canada vive nella regione dell'Ontario, quasi tutti i reattori sono collocati sul suo territorio, e le ricerche dimostrano l'atteggiamento favorevole verso l'atomo, si può affermare che sussistono buone prospettive per il futuro sviluppo di questa fonte energetica.

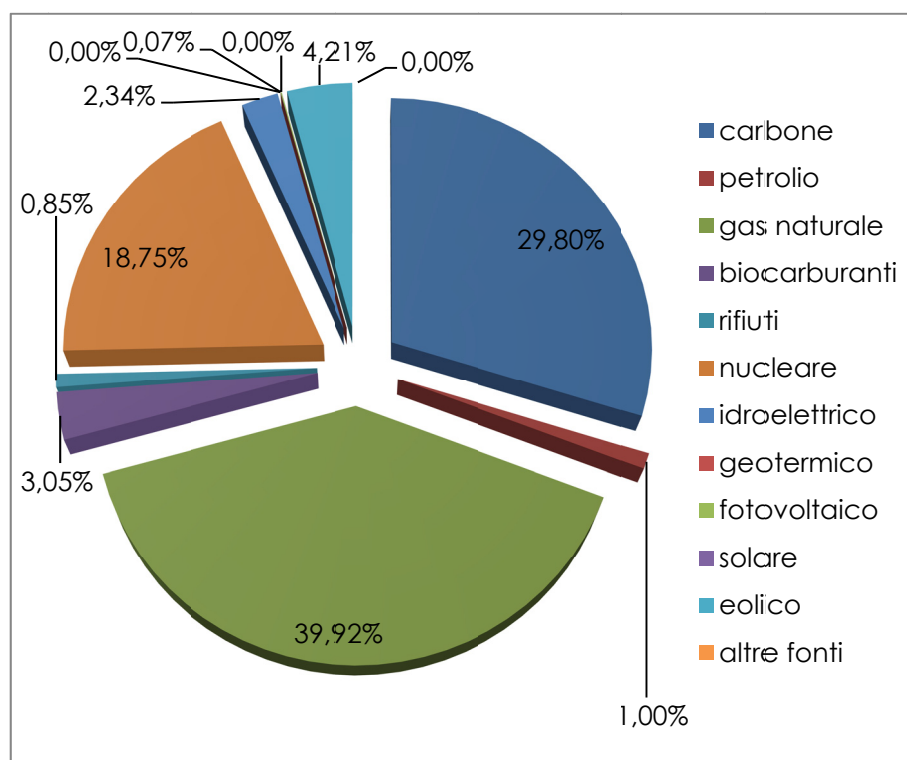
REGNO UNITO

Successivamente alla creazione dell'autorità Britannica per l'energia atomica, UKAEA, *United Kingdom Atomic Energy Authority*, nel 1954, il primo impianto a fornire commercialmente elettricità è stato connesso alla rete nel 1956, benché il maggior interesse fosse, al tempo, relativo alla produzione del plutonio per l'arsenale nucleare inglese. Il Regno Unito è stato, ancora prima del '54 un paese all'avanguardia nella ricerca nucleare, e di ciò ne è l'esempio la filiera Magnox, un reattore GCR, moderato a grafite e alimentato ad uranio naturale. In totale ne sono state costruite 26 unità in patria, una in Giappone, ed una in Italia, per la centrale di Latina. Molte di queste centrali sono in fase di decommissioning, specialità di cui il Regno Unito risulta leader al mondo insieme a Francia e Giappone. Questi paesi sono inoltre i più avanzati nella pratiche di reprocessing, ossia quelle operazioni che portano alla separazione delle varie componenti gli elementi di combustibile, al fine di produrre nuovo combustibile e gestire in sicurezza le scorie prodotte.

Alla fine del 2012, il Regno Unito registrava una nuclear share del 18,1%, conseguita attraverso 16 reattori, di cui, oltre al Magnox, risultavano 14 reattori AGR ("Advanced") di seconda generazione entrati in servizio tra il '72 e l'88, ed un PWR, operativo dal 1995.
Nonostante sia molto probabile che la vita degli impianti venga prolungata, nel paese si sta dibattendo in merito a quale via seguire per la futura politica energetica.
Il quadro attuale, vede il carbone come primo combustibile utilizzato nella produzione elettrica, seguito da gas naturale, nucleare e fonti rinnovabili, (***Grafico 20).***

GRAFICO 20. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (REGNO UNITO, 2012)

Fonte: World Nuclear Association, *Nuclear Power in the United Kingdom*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/United-Kingdom/>, aggiornato 24 dicembre 2013.

Una breve analisi dell'evoluzione recente, tra il 2011 e 2012, relativa al contributo delle fonti al totale, vede una diminuzione del gas, dal 40% al 28%, in favore del carbone, passato dal 30% al 39% e delle rinnovabili che salgono all'11,3%, dal 9,4%, (***Grafico 21*).**

GRAFICO 21. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (REGNO UNITO, 2011)

Fonte: International Energy Agency, *United Kingdom: Electricity and Heat for 2011*, <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=UK&product=electricityandheat&year=2011>, s.d. [2012?].

Le tappe del dibattito relativo alla futura politica energetica inglese, andando a limitare l'analisi all'ultima decina d'anni, hanno visto una tendenziale apertura sul tema dell'energia nucleare, anche per i vincoli alla emissioni di gas serra sottoscritti, fattore rilevante nelle decisioni di politica energetica.

Se si risale al 2005, i vicoli alle emissioni, considerata la loro progressiva e sempre maggior incidenza nel futuro, portò il governo Blair a valutare la costruzione di nuovi impianti a fissione, limitando successivamente le tecnologie candidate all'AP-1000 ed all'EPR Areva[41].

Nel 2008 il governo inglese dà il là alla costruzione di nuove centrali, e l'introduzione di una *carbon-tax* al fine di finanziare ed invogliare le imprese private ad investire nel nucleare. Ciò sembra incontrare l'interesse di due consorzi dell'industria.Nel 2009 individua dieci siti potenziali per i nuovi impianti, ridotti successivamente ad otto.

Nel 2011, l'incidente giapponese, dà una pesante battura d'arresto all'espansione dell'atomo inglese, anche a causa delle critiche rivolte al governo, di collusione con le utilities ed i costruttori, e di portare avanti politiche di whitewashing che mantenessero un atteggiamento favorevole nei confronti dell'industria. L'ostilità nei confronti delle decisioni governative, monta ancora di più, rafforzandosi, fino a sfociare nell'accusa, da parte di varie

[41] Office For Nuclear Regulation, *Taking GDA work forward in the light of the unprecedented events in Japan*, <http://www.hse.gov.uk/newreactors/gda-japan.htm>, settembre 2011, ultima consultazione 02/01/2014.

organizzazioni non governative, ed ambientaliste, consegnata alla Commissione Europea, che suggerisce che il governo inglese stia portando avanti un supporto istituzionale all'industria nucleare nella forma di veri e propri aiuti di stato, e di conseguenza in contrasto con le leggi sulla concorrenza della UE e determinando una penalizzazione delle fonti rinnovabili[42].

Il deterioramento della situazione, porta a questo punto alcune imprese, a ritirarsi dai progetti di nuovi reattori sul suolo inglese. Nonostante ciò, nel 2013, nuovi impianti vengono ritenuti essenziali per mantenere gli impegni di riduzione delle emissioni da parte di una commissione trasversale a più partiti inglesi, affermando altresì che se nuova capacità nucleare non verrà installata entro il 2025, la sicurezza energetica sarà minacciata a causa della dipendenza da altre fonti fossili di importazione.

Nel marzo 2013, viene pubblicato un documento governativo nel quale si afferma che vi è interesse da parte dell'industria nel rendere disponibili nuovi 16GW(e) entro il 2030, pur se si deve tenere in considerazione che l'intervento pubblico è inferiore rispetto a quello di altri concorrenti internazionali e specificando che la politica del governo è quella di lasciare in capo ai privati il finanziamento di nuove installazioni, pur specificando di mantenere un posizione di supporto ed un coinvolgimento di lungo periodo.

A fine 2013 sussiste un interesse per la realizzazione di un nuovo impianto da parte di EDF Energy, l'utility che controlla tutto il parco reattori inglese, ma i dettagli di un eventuale contratto sono ancora in fase di discussione.

Il nucleare sembra comunque destinato a rimanere oggetto di interesse, alla luce della condizione delle fonti fossili considerando che:

- le pressioni legate alla riduzione della CO_2 ed i correlati problemi ambientali, stanno mettendo in crisi il carbone e la sua industria, che è inoltre fortemente sovvenzionata dallo Stato, per ragioni di mantenimento dei livelli occupazionali, e invocano l'introduzione di nuove tecnologie più pulite.
- L'espansione dell'industria del gas registrata nei decenni passati si è arrestata, la produzione interna è in calo, ed il Regno Unito sarà costretto ad affidarsi a sempre più ingenti volumi di gas provenienti dalla Russia per alimentare gli impianti, ancora a discapito della propria autonomia energetica.
- Le energie rinnovabili sono in costante crescita, con un aumento sensibile della capacità installata di anno in anno, soprattutto per quanto riguarda l'eolico, di cui il Regno Unito è uno dei leader mondiali, ma nonostante le ottime performance, sarà necessario prevedere una fonte che garantisca il *base load*.

---

[42] Energy Fair, *LEGAL BID TO HALT NUCLEAR CONSTRUCTION: Lawyers send complaint to European Commission about subsidies for nuclear power, <http://www.energyfair.org.uk/news-releases/legal-bid>, 2011, ultima consultazione 01/03/2014*

Dal punto di vista dell'atteggiamento degli inglesi verso il nucleare, le ricerche indicano che esse è più favorevole oggi, con un aumento del 6% rispetto al 2011, ed attestandosi al 32%, mentre i contrari risultano il 29%[43]. Il numero di intervistati che non è ne a favore, ne contro, è del 27%. Inoltre chi percepisce che i benefici del nucleare sono superiori ai rischi, è in numero più rilevante rispetto a chi reputa vi siano più rischi che benefici. Le percentuali inoltre di chi ritiene che debbano essere costruiti nuovi impianti, in aggiunta, od in sostituzione di quelli che verranno spenti, sono superiori a chi ritiene sia necessario un disimpegno completo in tempi brevi od anche gradualmente. Più della metà, 55%, afferma che sarebbero più favorevoli al nucleare se questa tecnologia fosse più sicura, ed i rischi maggiori che vedono sono quelli legati allo stoccaggio delle scorie, incidenti, terrorismo e fenomeni naturali, in questo ordine. Altresì, le prospettive di un impatto positivo sul cambiamento climatico e sulla sicurezza energetica spingono la metà del campione a porsi favorevolmente a nuove costruzioni.

In conclusione, l'incidente di Fukushima, a differenza di quanto abbia fatto su altre popolazioni, non sembra aver pesato sull'opinione degli inglesi, forse anche grazie alla fiducia accordata, 33%, alle Autorità, per quanto riguarda il controllo e le norme sul nucleare esistenti. Ciò non significa che nel Regno Unito non vi siano preoccupazioni, soprattutto in tema di scorie, ma si può altrettanto affermare che la percezione degli inglesi è che quanto avvenuto in Giappone, difficilmente possa avvenire sul loro territorio, ed anzi l'energia nucleare potrà risultare una carta vincente per combattere il cambiamento climatico oltre che un'opportunità per l'economia.

RUSSIA

Anche la Russia, al tempo facente parte dell'Unione Sovietiva, rientra tra i paesi precursori. Era proprio sovietico infatti, il primo reattore per la produzione di elettricità ad essere connesso alla rete, seppur in via sperimentale, nel 1954.

L'evoluzione nel campo è continuata fino alla messa in operazione di filiere commerciali, concepite, progettate e costruite dall'industria del blocco orientale, adottando una pluralità di soluzioni, ma principalmente impianti PWR ed LWGR (RBMK), ed in numero limitato di BWR moderati a grafite.

Il complesso russo dell'energia, ha subito pesanti battute d'arresto però, prima con Chernobyl nell'86, e più violentemente con il crollo dell'Unione nei primi anni '90 con la conseguente crisi economica, che non ha fatto altro che aggravare, le condizioni difficili in cui già

[43] Wouter Poortinga et al., *Public attitudes to nuclear power and climate change in Britain two years after the Fukushima accident*, Cardiff, Working Paper of the UK Energy Research Centre, 2013, 15-23

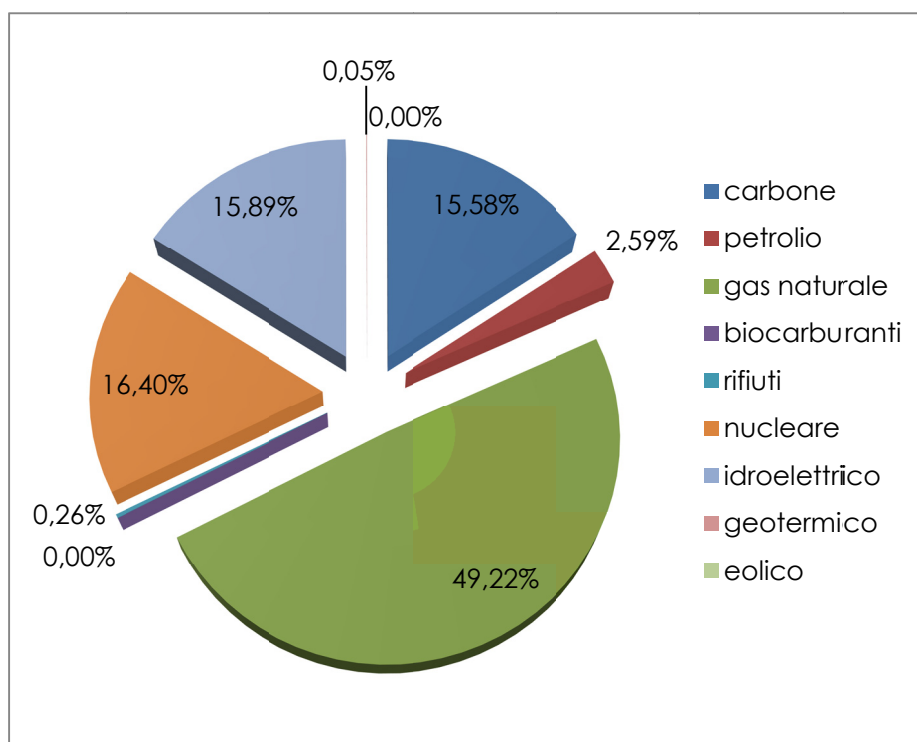
versavano alcuni impianti. Già tra la fine degli anni '80, e la metà dei '90 quindi, le riforme economiche intraprese hanno creato una penuria di fondi per l'industria nucleare, costringendo ad uno stato di attesa per diversi progetti già iniziati, periodicamente ripresi appena nuovi capitali si rendevano disponibili e successivamente interrotti quando questi ultimi terminavano. Ciò ha fatto si che solo due reattori siano stati resi operativi negli anni '90.

La ripresa dell'industria, si registra nel 2000, con la ripresa nei lavori e la conseguente messa in funzione di una nuova centrale nel 2001.

In anni più recenti, hanno raggiunto l'operatività altri tre reattori, nel 2005, 2010 ed 2012 rispettivamente.

Le nuove costruzioni sono di tipo VVER, abbandonando la filiera RBMK, anche se quest'ultima caratterizza ancora quasi la metà del totale del parco reattori.

A questo punto è utile fornire una visione generale dell'infrastruttura di produzione elettrica nel suo complesso, che può essere offerta dal ***Grafico 22.***

GRAFICO 22. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (RUSSIA, 2011)

Fonte: International Energy Agency, *Russian Federation: Electricity and Heat for 2011*, <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=RUSSIA&product=electricityandheat&year=2011>, s.d. [2012?].

Il primo dato interessante che si ricava è dato dal gas naturale, che contribuisce per la generazione di quasi la metà dell'elettricità prodotta. Ciò è spiegato dalle imponenti riserve

del territorio russo, le più grandi al mondo, che ne fanno una fonte strategica per il paese. Il carbone e l'idroelettrico, forniscono volumi molto simili di elettricità, mentre le altre rinnovabili sono praticamente assenti.

Il petrolio, nonostante la Russia ne sia il più grande produttore tra i paesi non appartenenti all'OPEC, pesa per meno del 3%.

In tema di nuclear share, questa si attestava al 16,40% nel 2011, mentre dati più aggiornati, la collocano al 17,8%. Al 31 dicembre 2012 inoltre, l'industria conta 11 reattori in costruzione, ponendo la Russia al secondo posto, dopo la Cina, per numero di progetti in corso di realizzazione[44].

Quanto appena visto sembra supportare l'affermazione secondo cui in Russia sia in corso una rinascita dell'atomo, anche alla luce delle decisioni governative degli ultimi anni. Queste si fondano su due direttrici, la costruzione di nuova capacità elettronucleare e un miglior utilizzo di quella esistente[45]. Un primo documento, che va nel verso della prima direttrice, datato 2006, prevede di rendere disponibile nuovi 2/3GW(e), annualmente, fino al 2030, con l'obiettivo di raggiungere una nuclear share del 45-50% entro il 2050, ed il 70-80% entro il 2100.

Nel 2010, nuovi piani governativi, hanno dettagliato di realizzare 43GW(e) di nuova capacità entro il 2030, basandosi su reattori VVER , ma portando avanti l'evoluzione di nuovi FBR, tecnologia in cui la Russia è leader mondiale, operando reattori di questo tipo fin dal 1981, in particolare con il design BN-600. Gli obiettivi a lungo termine sono infatti quelli di basare la futura infrastruttura di generazione elettronucleare, su filiere FBR, che permettano anche la chiusura del ciclo del combustibile. Per perseguire queste finalità le Autorità statali stanno fornendo il loro supporto, grazie ad ingenti finanziamenti, quantitativamente superiori a quelli anche di altri paesi occidentali.

Come si era accennato, la seconda direttrice consiste nel miglioramento della capacità esistente. Già nel periodo 1990-2010, la capacità degli impianti è sensibilmente aumentata, grazie ad interventi migliorativi che hanno permesso il raggiungimento di maggiori potenze di esercizio, nonché l'allungamento della vita utile dei complessi atomici. Anche per l'ormai obsoleta filiera dei reattori RBMK si sono effettuate, e continueranno, significative modifiche e riammodernamenti, portando la vita di alcuni impianti fino ai 45 anni dall'entrata in servizio. A fianco di ciò, nove reattori sono comunque destinati a cessare l'attività entro il 2020.

---

[44] International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 13

[45] World Nuclear Association, *Nuclear Power in Russia: Life extension, uprates and completing construction* e *Building new nuclear capacity*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/Russia--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013.

A dispetto dei progetti governativi, la popolazione russa pare ostile nei confronti del nucleare. Da un sondaggio 2011[46] infatti, risulta che solo il 9% degli intervistati, concordino che l'energia nucleare sia relativamente sicura e che si dovrebbero costruire nuovi impianti. Al contrario, il 43% ritiene che questa fonte sia pericolosa, e che tutti gli impianti dovrebbero essere chiusi il prima possibile, percentuale comunque maggiore di chi ritiene che sarebbe giusto sfruttare il parco reattori esistente ma non costruirne di nuovi.

In conclusione, risulta quindi una divergenza netta tra il sentire dell'opinione pubblica, e la politica governativa. Ciò detto, la determinazione, e le effettive necessità di soddisfare un crescente fabbisogno elettrico, unite agli investimenti che si stanno effettuando e i progetti già in costruzione, fanno propendere per un trend di espansione dell'industria nucleare sul suolo russo.

UCRAINA

Lo sviluppo del settore dell'atomo in Ucraina è da sempre stato fortemente dipendente dalla tecnologia e dal supporto della Russia. Ancora oggi, seppur i programmi governativi stiano intraprendendo un cambio di rotta, la maggior parte del combustibile e del sostegno tecnico proviene ancora da parte Russia[47].

Lo sviluppo dell'industria nucleare ucraina ha mosso i primi passi negli anni '70, ed in particolare con i reattori dell'impianto di Chernobyl. Il primo di questi è entrato in attività nel 1977, seguito da altri tre negli anni seguenti.

Come si è già avuto modo di accennare, questo primo impianto si basava su tecnologia RBMK, installata sul territorio ucraino come parte integrante del più ampio programma energetico definito dalle Autorità dell'Unione Sovietica. L'ucraina in questo programma ricopriva un ruolo importante, al punto da rappresentare il territorio con la maggior capacità nucleare civile, dopo quella presente sul territorio russo. Nel paese, grazie alla presenza di modesti giacimenti di uranio, era anche presente un settore estrattivo del minerale, che però veniva lavorato in Russia, data l'assenza di impianti di arricchimento in loco[48].

La maggior parte dei reattori del paese, sono stati costruiti negli anni '80 ma, dopo il primo impianto di Chernobyl, si è deciso di rivolgersi verso la tecnologia VVER. Ciò ha costituito un sensibile passo in avanti rispetto ai precedenti reattori a grafite, in particolare dal punto di

[46] Globescan, *Opposition to nuclear energy grows: global poll*, <http://www.globescan.com/news-and-analysis/press-releases/press-releases-2011/94-press-releases-2011/127-opposition-to-nuclear-energy-grows-global-poll.html>, 25 novembre 2011.
[47] World Nuclear Association, *Nuclear Power in Ukraine*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/Ukraine/>, aggiornato novembre 2013.
[48] Nuclear Threat Initiative, *Nuclear: Ukraine*, <http://www.nti.org/country-profiles/ukraine/nuclear/>, aggiornato febbraio 2013.

vista della sicurezza che, nonostante la dissoluzione dell'URSS, e la conseguente crisi economica, è sempre gradualmente aumentata negli anni e continua tuttora.

Visto dalla prospettiva odierna, anche l'incidente di Chernobyl dell'86, e la successiva moratoria di cinque anni sulla costruzione di nuovi impianti, non ha influenzato in modo decisivo l'industria nucleare del paese nel lungo periodo che, nonostante abbia presentato un calo temporaneo in termini di produzione elettrica, già nel 1995 ha ripreso a crescere, (cfr. ***Grafico 12, Andamento produzione elettrica da nucleare (primo gruppo di paesi))*** anche grazie all'entrata in funzione della più grande centrale del continente europeo. Il punto più critico può essere sicuramente considerato quindi il 1991, con la caduta dell'Unione Sovietica e l'improvvisa necessità di affrontare problemi che fino a quel momento, sotto l'URSS, erano rimasti latenti, e che la crisi economica ha fatto emergere costringendo a privatizzazioni, alla liberalizzazione del mercato ed ad altre misure per affrontare un crescente debito pubblico.

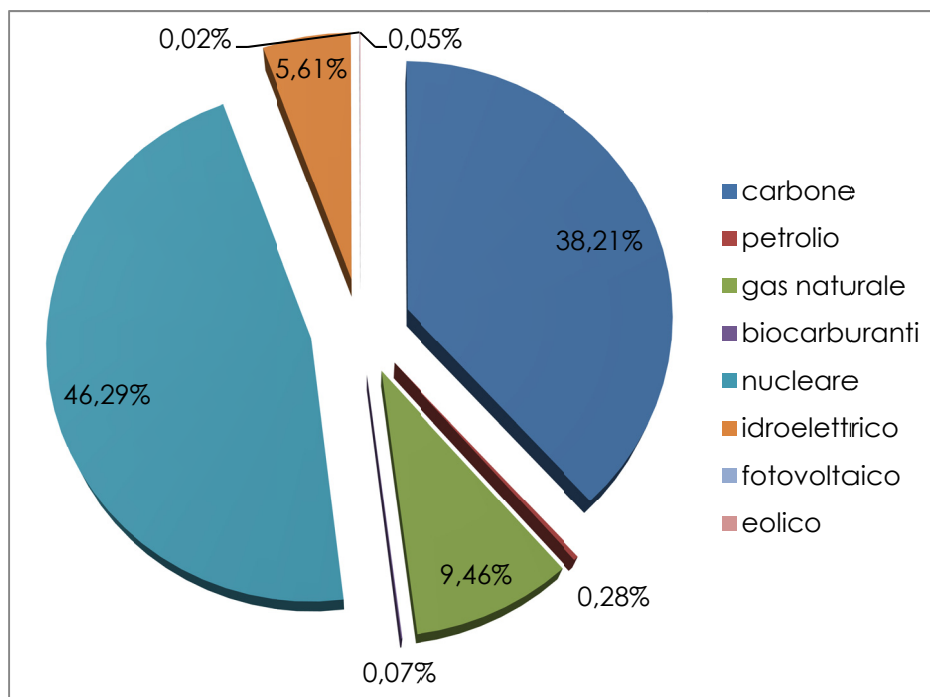
Dopo il 1995, la produzione elettronucleare ha continuato a salire fino al 2005, stabilizzandosi nel ultimi anni. Attualmente l'Ucraina trae dal nucleare una quota intorno al 46% sul totale dell'energia elettrica prodotta da tutte le fonti[49].

Solo il carbone costituisce un'altra fonte rilevante, seppur apportando un contributo inferiore rispetto al nucleare, con il 38%. Per quanto riguarda le rinnovabili, eolico e fotovoltaico presentano valori marginali, mentre l'idroelettrico contribuisce per più del 5%, ***(Grafico 23).***

Quasi il 10% della produzione deriva dal gas che, come il petrolio, viene per la maggior parte, circa il 70%, importato dalla confinante Russia, rivestendo un ruolo importante nel mix energetico del paese.

Il territorio ucraino risulta inoltre uno snodo fondamentale per l'infrastruttura, costiuita dalle *pipelines*, di trasporto del gas nei paesi dell'Est, ma anche e soprattutto verso l'Europa centrale, e proprio per questo non sono mancate dispute con il vicino russo, anche in anni recenti. Queste tensioni hanno portato l'Ucraina a concentrare i propri sforzi nella ricerca di nuovi giacimenti di metano sul proprio territorio, al fine di rompere, o almeno ridurre, la dipendenza dalla Russia, ed in prospettiva, sviluppare una propria rete di esportazione del gas verso l'Europa, che nei piani dovrebbe vedere la luce entro il 2020.

[49] International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 76

GRAFICO 23. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (UCRAINA, 2011)

Fonte: International Energy Agency, *Ukraine: Electricity and Heat for 2011*, <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=UKRAINE&product=electricityandheat&year=2011>, s.d. [2012?].

Anche alla luce delle considerazioni esposte, il nucleare, può giocare un ruolo strategico per il paese. Le Autorità ucraine sembrano anch'esse concordare sull'importanza di questa fonte dal momento che, ancor oggi, gli impianti sono gestiti da una utility di stato, l'Energoatom. Pur formalmente indipendente, questo organismo è però soggetto ad una costante ingerenza da parte del Rosatom, che tenta di far rimanere l'industria nucleare ucraina nella sua sfera di influenza. Queste pressioni hanno lo scopo di garantire alla Russia ed alle sue imprese industriali, i contratti legati al ciclo di fabbricazione del combustibile e del riprocessamento, ma anche per le opportunità future che si prospettano, per la fornitura di componenti per i nuovi reattori, o per quelli che debbano essere soggetti a manutenzione[50].

Energoatom si occupa della gestione di tutti i 15 reattori attualmente in funzione. Di questi, dodici sono entrati in funzione negli anni '80, uno alla fine del decennio dei '90 e due nel 2005. Inizialmente la vita prevista per la maggior parte dei reattori costruiti, era intorno ai 30 anni, limite che tredici reattori raggiungeranno al più tardi nel 2019. Nel corso degli ultimi anni sono però stati portati avanti numerosi programmi di riammodernamento degli impianti che dovrebbero garantire un allungamento fino a 40-45 anni dalla data di entrata in funzione. Questi interventi hanno inoltre garantito una maggior potenza di esercizio sfruttabile degli stessi reattori, che ha toccato un fattore di più dell'81% nel 2004. Nonostante l'aumento dello

[50] World Nuclear Association, *Nuclear Power in Ukraine: Nuclear industry structure and the Russian connection*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/Ukraine/>, aggiornato novembre 2013.

sfruttamento della capacità esistente, sembra necessaria per il paese anche l'installazione di nuova capacità nucleare, al fine di raggiungere un grado di sicurezza energetica superiore. Le Autorità sembrano sposare questa visione, e già dal 2008 sono in corso programmi di cooperazione con grandi gruppi come Areva, Westinghouse ed AECL, ma anche con la Russia e Sud Corea, per i futuri PWR che dovranno andare a sostituire i reattori in decommissioning nelle terza decade degli anni 2000[51].

Nei piani governativi, l'atomo dovrebbe riuscire a fornire intorno al 50% dell'energia elettrica totale nei prossimi decenni, attualmente l'obiettivo è molto vicino da essere raggiunto, ma va comunque tenuto in considerazione il costante aumento del fabbisogno elettrico della nazione. A metà del 2012, il 50% di share nucleare, si riteneva potesse essere raggiunto con la creazione di nuova capacità nell'ordine di 5-7GW(e) entro il 2030.

Un altro fattore su cui le Autorità ucraine intendono puntare per il futuro è l'aumento della capacità di produzione interna di combustibile. Al fine di perseguire questo obiettivo, l'Ucraina intende innanzitutto sviluppare con decisione il suo settore estrattivo, incentivando gli investimenti esteri per il reperimento dei capitali necessari. Si cercherà così di aumentare la produzione, per riuscire a soddisfare la domanda interna di minerale passando da 960 t/U del 2012 alle 1880 t/U entro il 2015 e possibilmente raggiungere le 6400 t/U annue nel 2030. Gli obiettivi sembrano, allo stato attuale, piuttosto ambiziosi per non definirli poco realistici, ancor più dopo le defezioni di alcune imprese che dovevano contribuire al progetto.

Parallelamente l'Ucraina necessita di aumentare la sua autonomia in relazione all'arricchimento e alla produzione degli elementi di combustibile. Il paese infatti, oltre all'uranio possiede riserve di zirconio, elemento essenziale per la produzione dei tubi in cui vengono inseriti i pellets. Anche in quest'ultimo caso però, lo stato ucraino, si limita all'estrazione, mentre tutto il processo di trasformazione viene portato avanti in Russia.

Negli ultimi anni, un piccolo cambiamento si è registrato con gli accordi di cooperazione tra Ucraina e Westinghouse per la fornitura di combustibile Usa da utilizzarsi nei reattori VVER, accordi che prevedevano contemporaneamente anche un trasferimento di know-how per la produzione di combustibile in loco. Nonostante i tentativi di slegarsi dall'importante vicino, ancora una volta l'Ucraina presenta legami difficili da rompere con la Russia. Nel giungo 2010, dopo l'esperienza appena descritta con l'impresa statunitense infatti, Energoatom ha firmato proprio con la russa TVEL un contratto ventennale per la fornitura di combustibile ai sui 15 reattori, ed ancora, nel successivo settembre, il progetto per la realizzazione di un complesso per la produzione di barre di combustibile, è stato nuovamente assegnato a TVEL,

[51] World Nuclear Association, *Nuclear Power in Ukraine: Increasing nuclear power capacity*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/Ukraine/>, aggiornato novembre 2013.

a danno di Westinghouse. Il progetto dovrebbe vedere la luce nel 2015, e comporterà anche in questo caso, il trasferimento di tecnologia all'Ucraina sotto una licenza non esclusiva di sfruttamento.

Guardando al lungo periodo, l'Ucraina sta portando avanti programmi di ricerca in campo nucleare molto marginali, con soli due piccoli reattori, di cui uno cesserà le operazioni a breve. Un nuovo reattore, per studi sulla materia e produzione di isotopi per la medicina, dovrebbe al contrario iniziare la sua attività nel 2014.

Nonostante la sperimentazione scientifica nel campo appaia carente, la compagine governativa si mostra decisa a favore dell'espansione del nucleare, ed anche molti cittadini sembrano condividere questa proposizione. Basandosi su un sondaggio di marzo 2011[52] infatti, il 35% degli intervistati riteneva che fosse necessario aumentare i fondi destinati all'energia atomica, contro il 18% che auspicava un taglio degli stessi, ed un 25% che riteneva che l'entità dei fondi dovesse rimanere invariata. Al contempo il 71% riteneva che maggiori fondi dovessero essere destinati all'eolico, mentre le altre fonti fossili presentavano percentuali di gradimento più basse. Il supporto al nucleare inoltre sembrava anche molto condizionato da ragioni di tipo economico infatti, il 53% degli intervistati, riteneva che l'aumento degli investimenti nel nucleare, poteva giocare un ruolo da protagonista nel portare ad un miglioramento economico ed alla creazione di nuovi posti di lavoro. Altre affermazioni sulle quali più del 50% degli intervistati concordavano, erano costituite dai benefici in termini di sicurezza energetica portati dal nucleare, grazie anche alla minor dipendenza dal gas, nonché della sostanziale sostenibilità ambientale e della economicità di questa fonte.

In conclusione, l'Ucraina si presenta con un paese che vorrebbe sviluppare ulteriormente una propria industria nucleare indipendente da altri paesi, ma la sua storia passata, anche relativa recente, la lega in maniera molto forte alla Russia. Questi legami sono sia di tipo tecnologico, la filiera di reattori è russa, così come il supporto tecnico e il combustibile per alimentare i reattori, ma anche di tipo economico. I tentativi di aprire agli investimenti esteri non hanno sortito grossi effetti nel settore, fatto salvo per i contributi accordati dalla Comunità Europea per forzare allo spegnimento definitivo e successivo decommissionig dell'impianto di Chernobyl ed il più recente progetto per la costruzione di un nuovo *sarcofag*o sul relitto del reattore 4, anche se tutti questi interventi non vanno chiaramente nella direzione di incentivare lo sviluppo di nuova capacità nucleare. Quello che invece è certo è il fatto che la Russia non intende perdere la sua posizione dominante, che le consente di avere un bacino di sbocco praticamente esclusivo per la propria industria nucleare, fornendo componenti e know-how.

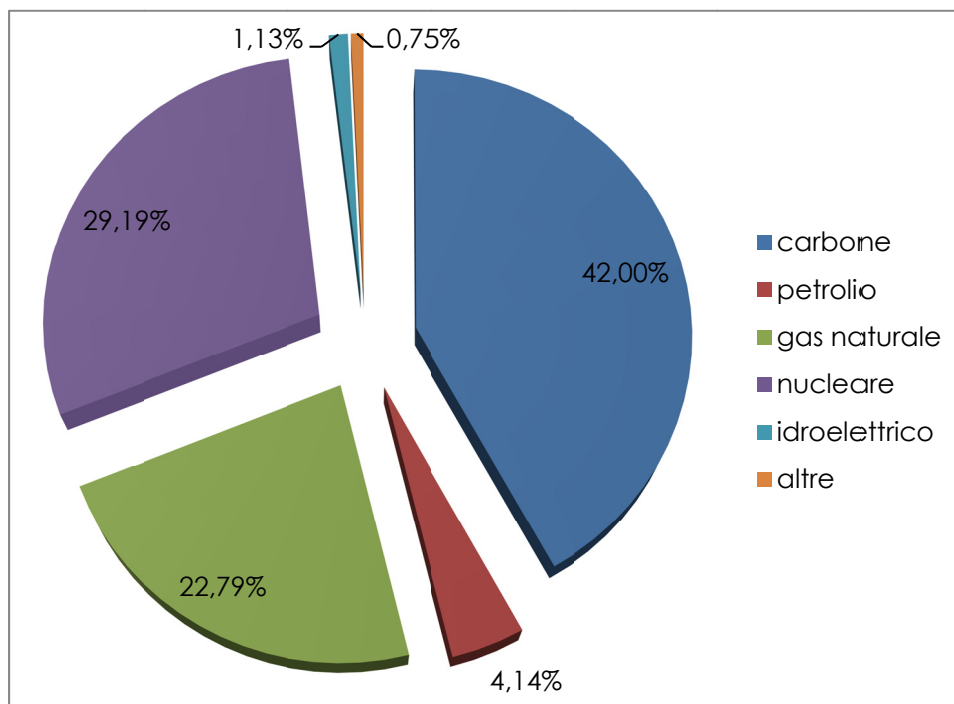
[52] Worldwide News Ukraine, *Opinion Poll of European Citizen on Prospect of Nuclear Energy*, <http://wnu-ukraine.com/news/?id=231>, 5 aprile 2011.

L’aumento delle tariffe elettriche, per permettere di finanziare il riammodernamento degli impianti esistenti, una nuova gestione del ciclo del combustibile e, in futuro, garantire i capitali per la costruzione di nuovi impianti, potrebbe essere una via percorribile e sortire benefici tangibili. Il raggiungimento di una maggior autonomia energetica, conseguita attraverso un qualsiasi mix di fonti, risulta comunque il maggior obiettivo strategico da perseguire, pena il rimanere ostaggio delle decisioni del vicino russo, sia che si parli di gas o di nucleare.

Finora si sono analizzati i paesi che per primi hanno adottato il nucleare, adesso se ne analizzerà uno che rappresenta un caso peculiare.
Richiamando il grafico relativo all’andamento dell’output elettrico da nucleare dei vari paesi, si può notare come una nazione abbia compiuto una crescita notevole, decuplicando l’elettricità prodotta tra l’85 ed il 2012, e questa nazione è la Corea del Sud.

COREA DEL SUD

Attualmente, l’energia elettronucleare prodotta proveine da 23 reattori, per la maggioranza PWR, congiuntamente a reattori CANDU. Grazie a questa flotta, il paese raggiunge una nuclear share del 30%, e l’atomo è la seconda fonte di produzione dopo il carbone, da cui si ricava attorno al 42% del totale dell’elettricità, e che possiede un peso maggiore del gas naturale e del petrolio. Tra le rinnovabili, solo l’idroelettrico ha valori rappresentabili, ma comunque attorno all’1%, (***Grafico 24).***

GRAFICO 24. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (COREA DEL SUD, 2012)

Fonte: World Nuclear Association, *Nuclear Power in South Korea*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>, aggiornato dicembre 2013.

Lo sviluppo del nucleare nel paese, ha seguito la crescita economica e la corrispondente crescita del fabbisogno elettrico. Questo trend, è destinato secondo le proiezioni a continuare ed addirittura aumentare, raggiungendo una nuclear share del 50% entro il 2020 e del 59% entro il 2030.

Stime governative più prudenti ritengono che l'obiettivo del 50% di nuclear share possa essere raggiunto entro il 2024, con la costruzione di nuovi 14 reattori, che salirebbero a 40 entro il 2030. Il programma delle Autorità, punta a far si che la Corea diventi il più grande esportatore al mondo di elettricità da fissione entro il 2030[53].

Il fattore fondamentale che ha permesso alla Corea di essere uno dei grandi protagonisti mondiali nel panorama nucleare è stata la sua capacità di sfruttare le tecnologie degli altri paesi, per gettare le basi per una propria industria nel settore, che le permettesse di intraprendere una propria via indipendente.

Il paese si è dotato del primo reattore commerciale nel 1978, e il parco si è notevolmente ampliato già durante gli anni '80, sfruttando tecnologia: americana, francese e canadese. Questi diversi design, hanno offerto la possibilità al paese asiatico di sfruttare diversi know-how, capitalizzando l'esperienza e le conoscenze e mettendole a frutto progressivamente nel

[53] World Nuclear Association, *Nuclear Power in South Korea: Development of nuclear program & policy*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>, aggiornato dicembre 2013.

programma di standardizzazione degli impianti coreani, che si poneva come obiettivo il raggiungimento di una maggiore autonomia nella costruzione e nella gestione degli stessi.
Già nel 1987 gli sforzi hanno permesso di definire lo standard KSNP, *Korean Standard Nuclear Plant*, che evolverà nel KSNP+ a fine anni '90, permettendo di raggiungere superiori livelli di sicurezza, efficienza, nonché di semplificazione e di ottimizzazione dei costi, concretandosi nel design commerciale OPR-1000, che già opera con 9 unità sul territorio della nazione asiatica.
L'attuale design, incorpora ancora alcuni elementi da altrui filiere, soprattutto americane, e quindi il prossimo obiettivo dell'industria coreana, saranno progetti totalmente di proprietà intellettuale del paese, e quindi non soggetti ad alcuna licenza. Progressivamente, i nuovi impianti, saranno costruiti sul nuovo modello APR-1400, esenti da proprietà intellettuale straniera, cosa che gioca un ruolo rilevante anche in merito alle opportunità di esportazione, altro traguardo da conseguire nella vision coreana. Già ora infatti, vi è un contratto per la fornitura di quattro unità agli Emirati Arabi Uniti, di cui una già in costruzione, ma esiste interesse anche in altri mercati come, oltre ad alcuni paesi asiatici: Turchia, Giordania, Romania ed Ucraina[54]. Ma la vitalità del settore nel paese, risiede anche nelle ricerche per nuove soluzioni tecnologiche di quarta generazione, oltre a quelle relative al reprocessing ed alla gestione delle scorie. La Corea del Sud infatti, persegue una strategia di ciclo aperto, al momento senza applicazione industriale del riprocessamento, cosa che parimenti avviene per quanto riguarda l'arricchimento. Questo stato di cose, trae la sua origine da eventi storici, ed in particolare negli accordi con gli Stati Uniti del 1973, per la cooperazione in tema di nucleare tra i due paesi. Si stima, che l'eliminazione di questi accordi, o meglio vincoli, o quantomeno il loro allentamento, potrebbe permettere alla Corea del Sud di aumentare la sfruttamento del suo combustibile, nonché di ridurre il volume delle scorie a più elevata attività. Allo stato attuale, questi accordi sono stati comunque recentemente rinnovati, con la prossima scadenza aggiornata al 2016[55].
Nonostante il fiorire dell'atomo coreano[56], l'atteggiamento della popolazione sul tema presenta delle criticità. L'incidente di Fukushima, ha fatto crescere le preoccupazioni sulla sicurezza dei reattori, ed anche le reticenze governative sulla pubblicazioni di sondaggi che mettevano in luce l'ostilità dell'opinione pubblica verso il settore, non hanno contribuito positivamente. Questo ultimo fatto in particolare, è seguito allo scandalo relativo alla falsificazione di certificati relativi a parti di ricambio di due reattori, in seguito chiusi, e da

[54] World Nuclear Association, *Nuclear Power in South Korea: Reactor development*, intellectual property, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>, aggiornato dicembre 2013.
[55] World Nuclear Association, *Nuclear Power in South Korea: Fuel cycle*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>, aggiornato dicembre 2013.
[56] Meeyoung Cho, *South Korea to expand nuclear energy despite growing safety fears*, Reuters, <http://www.reuters.com/article/2013/01/08/nuclear-korea-idUSL4N0AD1CB20130108>, 7 gennaio 2013.

un'altra chiusura sospetta ad inizio 2012. Inoltre l'industria è criticata per promuovere una cultura della segretezza, che alimenta i sospetti in merito a presunte pratiche illecite da parte delle autorità coinvolte nel rilascio delle autorizzazioni sulla sicurezza, che paiono altresì fondate. Il reato a cui si fa riferimento è, nella maggior parte dei casi, quello di corruzione, la stessa accusa che ha portato recentemente in carcere quasi 100 persone del settore nucleare[57], L'ultimo sondaggio disponibile, di fine 2012, proveniente da organi ufficiali coreani, rileva come l'opinione dei cittadini in merito alla sicurezza del nucleare si stia deteriorando. Una percentuale, comunque elevata, 34,8% degli intervistati, lo ritiene sicuro, ma questo dato è notevolmente inferiore al 71% fatto registrare ad inizio 2010. In aggiunta a quanto detto, un altro studio[58], questa volta condotto da un gruppo di rappresentanti dell'industria, mondo accademico e cittadini, è giunto alla conclusione condivisa, che sarebbe raccomandabile ridurre la nuclear share entro un range tra il 22% ed il 29%, quindi in netto contrasto con i piani governativi. Gli altri suggerimenti emersi riguardano il mantenimento del peso delle rinnovabili, oltre all'imposizione di tasse sugli impianti a carbone e la contemporanea riduzione delle stesse sul gas naturale.

Anche in Corea, come già si era visto in Russia, si rileva una divergenza tra quanto espresso dai cittadini ed i piani governativi. Rimane comunque un fatto che nella politica energetica coreana, il nucleare avrà ancora una posizione di rilievo, forse di predominanza sulla altre fonti fossili, data la penuria sul territorio di queste ultime, unita ad un contributo da parte delle rinnovabili marginale, e dal crescente fabbisogno energetico. La richiesta di energia elettrica infatti, seppur abbia rallentato la sua velocità di crescita, dal 9% annuo che mediamente si registrava negli anni '90, fa segnare ancora incrementi del 2,8%.

Una nota è doverosa in tema di atomo militare. Sorprendentemente, secondo un sondaggio di inizio 2013, ben il 66% dei coreani intervistati[59], concordano sull'opinione secondo cui il paese dovrebbe sviluppare un proprio programma di armamenti atomici, percentuale aumentata rispetto al 62,6% fatto registrare nel 2011. I numeri si spiegano sicuramente dalle tensioni tra i due paesi della penisola coreana[60], ma il governo non sembra concordare con quanto invocato dai cittadini, soprattutto considerando la sussitenza di accordi che garantirebbero il supporto militare USA, anche con armi termonucleari, in caso di un'eventuale conflitto.

---

[57] Ju-Min Park, *South Korea charges 100 with corruption over nuclear scandal*, Reuters, <http://www.reuters.com/article/2013/10/10/us-korea-nuclear-idUSBRE99905O20131010>, 10 ottobre 2013.

[58] Meeyoung Cho, *South Korea should lower reliance on nuclear: study*, Reuters, <http://www.reuters.com/article/2013/10/13/us-energy-korea-nuclear-idUSBRE99C00Z20131013>, 12 ottobre 2013.

[59] Kim Jiyoon, Karl Friedhoff, Kang Chungku, *The fallout: South Korea public opinion following North Korea's third nuclear test*, Seoul, The Asan Institute for policy studies, 2013, 8

[60] K.J Kwon, *Under threat, South Koreans mull nuclear weapons*, CNN, <http://edition.cnn.com/2013/03/18/world/asia/south-korea-nuclear/>, 19 marzo 2013.

La strada verso l’atomica coreana, era già stata imboccata negli anni ’70, ma rimasta allo stadio embrionale e definitivamente abbandonata con la ratifica del trattato di non proliferazione nel 1975. Inoltre il governo della Corea del Sud è attualmente molto attivo a promuovere lo stop alla diffusioni di ordigni atomici e delle tecnologie per produrre testate nucleari ed altre armi atomiche.

Anche in due paesi in rapido sviluppo il nucleare gioca un ruolo importante per garantire l’energia necessaria ad alimentare la crescita, come avviene in Cina e in India.

INDIA

Lo sfruttamento del nucleare in India è ancora limitato, anche se questa nazione conta ben 20 reattori operativi, seppur di bassa potenza unitaria, nel complesso meno di 5000MW(e), che determinano una nuclear share del 4%[61]

Attualmente, la politica energetica indiana, deve fare i conti con una rilevante dipendenza dalle importazioni, per coprire il crescente fabbisogno. Infatti, se pur la produzione elettrica è più che triplicata nel periodo 1990-2011, l’elettricità pro-capite disponibile risulta ancora contenuta. I motivi di questa situazione sono da ricercarsi essenzialmente nell’incremento demografico, ma anche nello stato dell’infrastruttura di rete, che genera rilevanti perdite nel trasporto, e necessita di una riforma radicale e, conseguentemente, ingenti investimenti, cosa che fino ad ora non si è stati in grado di attuare. Si consideri inoltre, che più del 30% degli abitanti dell’India ancora non hanno accesso alla rete elettrica o, se lo hanno, l’erogazione è soggetta ad interruzioni, anche prolungate. La situazione è poi particolarmente difficile nelle zone rurali, anche se le Autorità si stanno lentamente muovendo in questo senso, cercando di porre rimedio con piccoli impianti indipendenti, basati su rinnovabili.

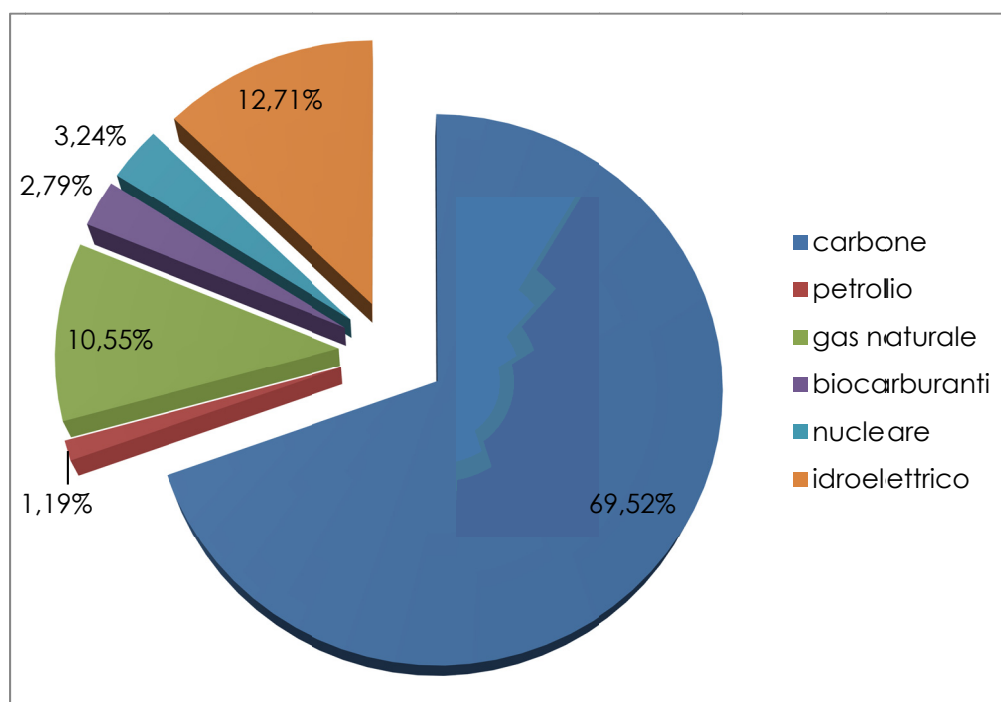
Per un quadro generale della situazione della produzione elettrica nel paese, si rimanda al ***Grafico 25.***

La produzione elettrica dipende per quasi il 70% dal carbone, combustibile di cui l’India detiene riserve ingenti, ma che si caratterizzano per la scarsa qualità, dovuta al basso potere calorifico e all’alto tenere in ceneri. Oltre a questo si consideri che il settore è notevolmente centralizzato ed inefficiente e, come prevedibile, a ciò si aggiungano i problemi legati all’inquinamento che stanno via via acuendosi.

La seconda fonte di produzione, è invece costituita dall’idroelettrico. Di questa tecnologia, l’India è stata una dei primi utilizzatori e, nonostante sia attualmente molto sfruttata, il

[61] International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 12

potenziale stimato ancora installabile è molto rilevante, soprattutto per quanto riguarda l'idroelettrico di taglia medio-piccola, inferiore ai 25MW(e)[62].

GRAFICO 25. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (INDIA, 2011)

Fonte: International Energy Agency, *India: Electricity and Heat for 2011*, http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=INDIA&product=electricityandheat&year=2011>, s.d. [2012?].

Un'altra fonte rilevante è costituita dal gas naturale che, come il carbone, viene in parte estratto nel paese, ed in parte importato.

Le fonti rinnovabili, ad esclusione dell'idroelettrico, apportano un contributo limitato alla produzione elettrica, ed il caso del fotovoltaico è esplicativo delle potenzialità del paese non sfruttate. La localizzazione del territorio indiano infatti, presenta ottime caratteristiche di irraggiamento, ma nonostante ciò la produzione fotovoltaica nel 2011 è stata marginale, inferiore al 0,01% sul totale dell'elettricità prodotta. A questa situazione si sta cercando di porre rimedio, e secondo fonti governative, la capacità installata, dovrebbe raggiungere i 22 GW(e) entro il 2020.

Riposizionando l'attenzione sull'energia nucleare, il suo sfruttamento nel paese, ha preso il via tra la fine degli anni '50 ed i '60, con l'assistenza del Canada per la messa in funzione di

[62] Giulia Cecchi et al., *Il sistema energetico dell'India e le sue prospettive*, Report per Master in Management dell'Energia e dell'Ambiente 2011 - 2012, Università degli Studi Roma Tre, Facoltà di Economia, a. acc. 2011-2012, 42

un primo reattore sperimentale, ma si dovrà attendere il 1972 per la produzione commerciale, attraverso un impianto CANDU[63].
A seguito del test atomico indiano del 1974[64], USA e Canada ritireranno il proprio contributo all'industria nucleare, anche sulla base del rifiuto a ratificare il trattato per la non proliferazione da parte del paese. Proprio quest'ultima mossa, ha fatto si che l'India rimanesse, per decenni, impossibilitata ad ottenere assistenza e combustibile da paesi occidentali. L'isolamento del paese, ha fatto si che esso sia stato costretto a sviluppare una proprio approccio autonomo, che riuscirre a portare avanti tutte le attività della filiera, dalla ricerca ed estrazione dell'uranio, alla produzione di acqua pesante, dalla progettazione, alla costruzione e gestione degli impianti e delle relative scorie. Questo progetto è stato però in parte minato, oltre che dalla minor esperienza disponibile rispetto ad altri paesi, anche dalla scarsità di riserve di uranio indigene, a cui si è tentato di sopperire, sviluppando soluzione per il reprocessing del combustibile esausto già nel 1964, via che sta tuttora perseguendo anche grazie ad un nuovo impianto aperto nel 2011, mossa che ha riaffermato l'importanza di queste pratiche per il paese.
Una spinta dall'esterno al nucleare indiano, è invece giunta nel 2007, con l'allentamento dei vincoli imposti dai paesi occidentali sul commercio di combustibile nucleare ed attrezzature, generando conseguenti ricadute positive[65].
Le minori restrizioni, stanno inoltre producendo effetti positivi anche sull'industria pesante del paese, che ha visto fiorire investimenti e joint-ventures per la fornitura di componenti, sia per i futuri reattori indiani, ma anche per commesse di imprese come Westinghouse, GE-Hitachi, Areva e per impianti VVER. Questi progetti, garantiranno all'India una sempre maggior esperienza nella costruzione di componenti essenziali dei reattori, generando economie di apprendimento e di scala, che permetteranno di contenere i costi di investimento per nuovi impianti ad alto tasso di tecnologia indigena. La nuova esperienza accumulata, nei piani delle Autorità, dovrà venire sfruttata per fronteggiare il sempre maggior fabbisogno elettrico, se si pensa che attualmente, la produzione elettrica totale può garantire solo 752kW(h) annui pro-capite, ma il consumo è destinato, secondo le previsioni, a raddoppiare entro il 2020, crescendo del 6,3% all'anno, fino a raggiungere i 5000-6000kW(h), pro-capite annui entro il 2050. A questo, si aggiunga, come già accennato, che anche chi oggi, non è connesso alla rete, con il progressivo miglioramento delle condizioni di vita generali, premerà

---

[63] World Nuclear Association, *Nuclear power in India: Indian nuclear power industry development*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, aggiornato dicembre 2013.
[64] World Nuclear Association, *Nuclear power in India: BACKGROUND TO NUCLEAR PROLIFERATION ISSUES*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, aggiornato dicembre 2013.
[65] World Nuclear Association, *Nuclear power in India: Non-proliferation, US-India agreement and Nuclear Suppliers' Group*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, aggiornato dicembre 2013.

per godere di questo servizio, esacerbando una condizione già critica, con rischi di interruzione delle forniture per centinaia di milioni di persone, evento che potrebbe portarea alla paralisi il paese.

Per fronteggiare questa situazione, il governo indiano, sta mettendo in campo un programma a lungo termine che, da un lato, prevede un radicale riammodernamento della rete elettrica che, si stima, causi al paese perdite annue pari a 13 miliardi di $, dall'altro, l'aumento della capacità installata con il conseguente aumento della produzione. Le Autorità prevedono, per il periodo 2012-2017, di rendere disponibili nuovi 94GW(e), derivanti per il 75% da impianti a carbone ed affini, e da nuovi reattori per il rimanente. Al raggiungimento di questo obiettivo, sono state destinate somme per 246 miliardi di $, una quantità di denaro rilevante, ma lontana da quanto l'Agenzia Internazionale per l'Energia ha stimato serva all'India per la generazione, trasmissione e distribuzione dell'energia entro il 2035, pari a 1600 miliardi di $. L'interesse appare quindi essere ancora molto elevato per il carbone, che permetterebbe di mettere online nuovi 60GW(e) entro il 2015, in tempi più brevi rispetto a quelli necessari per il nucleare.

A prescindere dai capitali destinati, l'amministrazione indiana, punterebbe comunque ad una nuclear share del 25% entro il 2050. Stime più realistiche prevedono però che i futuri traguardi possano essere 14,6GW(e) nel 2020, che dovrebbero diventare 27,5GW(e) entro il 2032. Di certo attualmente, vi sono i sei reattori in costruzione, per una potenza complessiva di 4,3GW(e), nonché l'interesse profuso nello sviluppo di un ciclo del combustibile basato sul torio[66]. L'interesse per questo elemento, deriva dalla sua abbondanza nel suolo indiano, nonché per la già disponibilità di know-how per quanto concerne gli impianti PHWR.

Il ciclo è basato su tre fasi e tre tecnologie distinte:

1. produzione di plutonio attraverso reattori PHWR alimentati ad uranio naturale, ed altri LWR ad uranio arricchito
2. utilizzo del plutonio in reattori FBR insieme al torio per ricavare ^{233}U fissile
3. utilizzo di ^{233}U e Pu per la produzione di energia

Il processo richiede quindi investimenti in nuovi FBR, già iniziati, che dovrebbero portare a rendere disponibile un reattore sperimentale entro la fine del 2014, già in avanzata costruzione, mentre altri 6 sono stati annunciati. L'obiettivo indiano è far si che la tecnologia di riferimento per le nuove costruzioni, successive all'anno 2020, sia l'FBR, ed a questo scopo, la Commissione per l'Energia Atomica Indiana ha già stretto accordi con il Rosatom , l'Agenzia Statale Russa per l'Energia Atomica.

[66] World Nuclear Association, *Nuclear power in India: Thorium fuel cycle development in India*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, aggiornato dicembre 2013.

L’industria nucleare indiana è attiva anche sul fronte delle esportazioni, offrendo impianti basati su reattori PHWR, di piccola, 220MW(e), e media, 540MW(e) taglia, anche abbinati ad impianti convenzionali, come quelli di desalinizzazione.

Per concludere il quadro, si analizzerà l’opinione dei cittadini indiani in tema di nucleare. I dati[67] mostrano che l’atteggiamento dei cittadini è tendenzialmente favorevole, all’uso civile dell’energia atomica, che la supporta per il 61%. Tra chi ha espresso la propria opposizione, si è andati a verificare se ciò fosse stato determinato da quanto avvenuto in Giappone, ed i risultati mostrano come il 50% afferma come questa opinione contraria sia stata proprio influenzata dall’evento.

In tema di espansione della capacità nucleare, gli indiani sono divisi a metà, tra il 49% che ritiene che si debba procedere con la costruzione di nuovi reattori, ed il 51% che ritiene che i nuovi progetti di impianti andrebbero fermati.

Come si è precedentemente affermato, la produzione elettrica in India, viene effettuata, per una quota preponderante sul totale, attraverso carbone. Il sondaggio prevedeva quindi di domandare se la produzione elettronucleare fosse vista come un mezzo per modernizzare il settore energetico, e se si ritenesse una soluzione a cui affidarsi per il lungo periodo. La divisione tra gli intervistati è stata, in questo caso, perfetta, con il 50% che ritiene il nucleare una fonte moderna e praticabile nel lungo periodo, mentre l’altra metà la ritiene limitata e presto obsoleta.

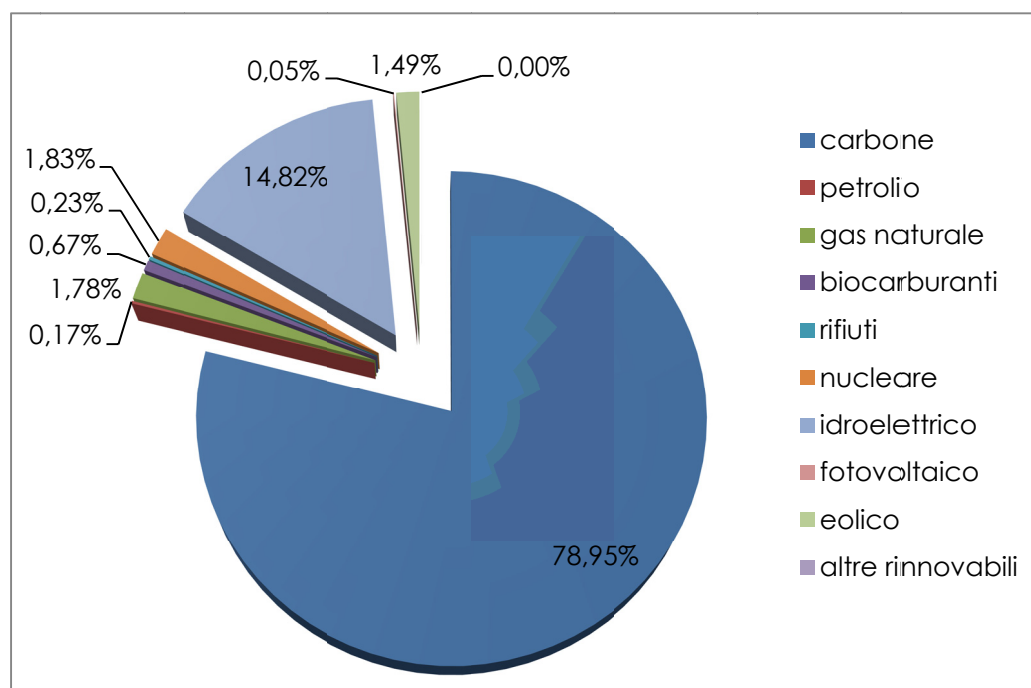
In conclusione, i cittadini indiani, seppur presentando tassi di supporto molto elevati rispetto ai paesi occidentali, sono rimasti colpiti dall’incidente in Giappone, che hanno fatto emergere dubbi circa lo sviluppo del programma nucleare nel loro paese. Nonostante ciò, l’India è pressata a trovare una soluzione sostenibile alla sua enorme fame di energia, e contemporaneamente, a mettere un freno alle emissioni inquinanti, che si stanno configurando come una vera e propria emergenza. Parte del fabbisogno, potrebbe essere soddisfatto dal fotovoltaico, ma ciò necessiterebbe ingenti ed immediati investimenti per recuperare l’attuale stato di scarsissima diffusione. Il nucleare invece, ed in particolare quello basato sul ciclo del torio, potrebbe rispondere efficacemente alle sfide che l’India si trova di fronte, aumentando l’autonomia del paese così da dipendere meno dalle importazioni di energia. Inoltre, dal punto di vista economico, il nucleare contribuisce direttamente ed indirettamente allo sviluppo di altri settori, agendo anche da attrattore di investimenti esteri.

[67] Ipsos Mori, *Global citizen reaction to the Fukushima nuclear plant disaster*, http://www.ipsos-mori.com/Assets/Docs/Polls/ipsos-global-advisor-nuclear-power-june-2011.pdf, giugno 2011.

CINA

Anche un altro stato confinante con l'India, la Cina, si trova a dover fronteggiare simili sfide in campo energetico.

Anche per quanto riguarda il contributo delle varie fonti alla produzione elettrica, si possono individuare delle somiglianze, ***(Grafico 26).***

GRAFICO 26. FONTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA (CINA, 2011)

Fonte: International Energy Agency, *China, People's Republic of: Electricity and Heat for 2011*, http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=CHINA&product=electricityandheat&year=2011>, s.d. [2012?].

In Cina, e più di quanto avviene in India, la produzione elettrica si basa sul carbone, del quale il paese detiene le riserve provate più estese, dopo USA e Russia. A causa dell'estensione del suo territorio tuttavia, e della localizzazione della maggior parte dei giacimenti nel nord del paese, il carbone deve essere trasportato verso il sud, dove invece trovano collocazione i maggiori impianti produttivi, generando rilevanti problemi logistici per la rete ferroviaria, che per circa la metà della capacità rotabile totale, è impegnata unicamente nel trasporto di questo materiale. A ciò si aggiungano i già menzionati problemi ambientali e sociali legati alla combustione, che si stanno ripercuotendo in misura rilevante anche sull'economia del paese, tanto è la loro gravità. La Cina infatti, è il maggior produttore mondiale di CO_2, e la maggioranza dell'inquinamento atmosferico interno, deriva proprio dalla combustione del carbone. Inoltre si aggiunga, che l'utilizzo di carbone, negli scorsi anni, è aumentato di pari passo con il consumo energetico. Per dare alcune cifre: nel periodo 2000-2005, ad un aumento del consumo elettrico del 70%, è corrisposto un maggior sfruttamento del carbone del 75%.

A complicare ulteriormente questo quadro, gli impatti del relativo inquinamento sulla salute umana, sono rilevanti. Inoltre è opportuno considerare che il carico per lo Stato, per il sostenimento delle cure, perdite economiche dovute a minor produttività ed efficienza, ecc., comporta costi monetari che, per l'anno 2003, erano stimati tra l'1,2% ed il 3,8% del PIL[68], quindi tra 19,68 ed 62,32 miliardi di $.

In termini di impatti economici sui beni, bisogna citare i danni prodotti ai raccolti ed alle foreste in seguito alle piogge acide, alle alte concentrazioni di ozono e di altri foto-ossidanti, causati dall'esposizione diretta o conseguenti all'acidificazione graduale dei suoli, stimati in più di 3,62 miliardi di $[69], per il solo 2003 . Altri danni materiali riguardano quelli ai manufatti, costituiti dalla corrosione ed dal deterioramento degli edifici, monumenti ed alle infrastrutture di comunicazione, stimati in circa 810 milioni di $[70], per le sole regioni del sud del paese, più esposte al fenomeno, ed ancora, per il solo 2003.

Anche le Autorità governative non possono più minimizzare l'impatto dell'inquinamento, con dati dell'aria drammatici nelle maggiori città, con punte di inquinanti superiori anche di 40 volte ai limiti posti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità.

In considerazione di tutto ciò, l'ultima volta nell'estate 2013, il Consiglio di Stato cinese, ha annunciato di voler ridurre le emissioni di gas serra del 40%, rispetto a quanto registrato nel 2005, entro il 2020, ed incrementare gli sforzi per far si che le energie rinnovabili abbiano nel futuro un ruolo maggiore, fino al 15% sul totale dell'elettricità prodotta.

A prescindere dalle intenzioni espresse, comunque, il fabbisogno elettrico è previsto in crescita del 6,5-8,5% nel 2013 rispetto all'anno precedente, crescita che seppur inferiore al 12% su base annua registrato nel 2012, rimane rilevante, ed inoltre implica un aumento delle emissioni di CO_2 di circa il 2,7%[71].

Dei piccoli passi in avanti, si stanno compiendo in direzione della chiusura degli impianti a carbone più piccoli ed inefficienti, ma se si considera che il 59% del totale della nuova capacità installata nel 2012, era composta proprio da impianti a carbone, si più prevedere che questo combustibile giocherà ancora un ruolo importante nei prossimi decenni, seppur ci si stia anche muovendo nella direzione di implementare dispositivi atti a contenerne le emissioni, ed altre pratiche come il sequestro della CO_2.

La Cina però è anche il più grande produttore mondiale di energia idroelettrica, con una quota sul totale prodotto dal paese, di circa il 15%.

[68] The World Bank, *Cost of pollution in China: Economic estimates of physical damages*, Pechino, The World Bank, 2007, 74
[69] Ibidem, 116
[70] The World Bank, *Cost of pollution in China: Economic estimates of physical damages*, Pechino, The World Bank, 2007, 124
[71] World Nuclear Association, *Nuclear Power in China*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013.

Gli investimenti per progetti ciclopici, hanno portato a manufatti come la *Diga sul Fiume Giallo* e quella delle *Tre Gole* che, assieme, sviluppano una potenza di 38GW(e), pari a 38 reattori nucleari di dimensioni standard.

Vi è inoltre da considerare che i luoghi più ricchi in acqua del paese, sono localizzati al centro-sud, relativamente vicini ai grandi centri industriali, permettendo di aggirare le criticità relative al trasporto dell'energia, al contrario di quanto avviene con il carbone. Inoltre, i margini nell'espansione della capacità installata sono ampi. Se ci si basa infatti su una relazione governativa del 2007, la potenza installabile nel paese si aggirerebbe su 540GW(e)[72]. Sulla base di questa prospettiva, la Cina dovrebbe raggiungere i 380GW(e) operativi entro il 2020, ma questo obiettivo potrebbe essere in parte minato dalla crescente opposizione dell'opinione pubblica, che invoca a valutare con sempre maggior cura gli impatti sull'ecosistema e sulle popolazioni che abitano nei territori delle dighe. Vi sono infatti da registrare gli impatti sulla fauna e la flora, che enormi progetti come quello del Tre Gole, hanno cagionato, che sono arrivati fino a decretare l'estinzione di specie autoctone, e la pesante modifica indotta all'ambiente che inoltre, ha causato fenomeni di grave dissesto idrogeologico. A questi, si aggiungano gli impatti sulle popolazioni che si sono viste costrette a trasferirsi in altri luoghi, a causa dell'inaridimento dei suoli dovuto alla modifica della morfologia e portata dei corsi d'acqua, quando non proprio a causa dell'insistere dei manufatti ed altre opere collegate, sulle loro proprietà. Anche gli apparati governativi sembrano iniziare a tenere in considerazioni queste tematiche, dato che alcuni progetti sono stati sospesi a seguito dei rischi, quando non proprio a danni certi, che ne sarebbero derivati[73].

Rimanendo in tema di energie rinnovabili, il paese asiatico, ha in programma di investire quasi 500 miliardi di $, entro il 2015, per la loro diffusione. Di questi capitali beneficerà, oltre che il già citato idroelettrico, anche il settore eolico, seconda fonte rinnovabile in Cina, del quale, quest'ultima, è il secondo maggior produttore mondiale. L'eolico comunque, nonostante l'installazione di nuova capacità segua un trend esponenziale, quasi raddoppiando tra un anno ed il successivo, è penalizzato dall'infrastruttura di distribuzione, facendo si che molta capacità installata non immetta l'elettricità prodotta per la mancanza di allacci alla rete.

L'ultima fonte rinnovabile, e la meno sfruttata, rimane il solare, anche se si prevede di poter incrementare la potenza disponibile dai 3GW(e) del 2011, fino a 25GW(e) entro il 2020.

Passando al nucleare, al 31/12/2012, il paese faceva registrare una share del 2%, raggiunta attraverso l'operatività di 17 reattori, per una potenza totale di 12,86GW(e). La maggior parte,

[72] Manfredi Rubino, Marco DeVita, Michele Angioni, *La situazione energetica in Cina*, Report per Master in Management dell'Energia e dell'Ambiente 2012 - XI° Edizione, Università degli Studi Roma Tre, Facoltà di Economia, 2012, 29
[73] Ibidem, 31

è costituito da tipologie PWR di vari costruttori. Sono presenti anche due reattori CANDU-6 PHWR, ed altri di tipo sperimentale[74].

La crescita dell'industria nucleare cinese, è stata una delle più veloci al mondo, se si pensa che la prima connessione alla rete è avvenuta solo nel 1991. A questa ne sono seguite molte altre che hanno comportato l'incremento dell'energia prodotta, pari a quasi il 600% in 12 anni, passando da 16TW(e)h del 2000, a più di 92TW(e)h del 2012, (cfr. ***Grafico 12 Andamento produzione elettrica da nucleare (primo gruppo di paesi))***. E' quindi indubbio che, la Cina, riponga una notevole fiducia in questa fonte per il futuro, per soddisfare il crescente fabbisogno energetico interno e per mettere un freno alle emissioni, come confermato ufficialmente anche a fine 2011, quando l'Agenzia Cinese per il Nucleare, ha affermato che il paese farà dell'atomo il cardine dell'infrastruttura di produzione elettrica per i prossimi 10-20 anni.

Il percorso dell'industria cinese si è basato, inizialmente, sull'acquisizione di tecnologia dall'estero, in particolare da Canada e Russia ma soprattutto dalla Francia.

Attualmente lo sviluppo del nucleare nel paese, si basa su tecnologia americana Westinghouse, ed in particolare sul design AP-1000, con l'obiettivo, che si sta realizzando, di costruire impianti di terza generazione, con reattori da 1400MWe, con diritti di proprietà intellettuale cinese[75].

Più in generale, la strategia nucleare cinese per il futuro, è incentrata su una sempre maggior indipendenza energetica da realizzarsi grazie a reattori PWR, massimizzando, per quanto possibile, la realizzazione domestica di impianti e relative strumentazioni, aumentando inoltre l'autonomia nella produzione e nel riprocessamento del combustibile, mantenendo però aperte le porte ad investimenti ed al supporto da paesi stranieri. Anche per quest'ultima finalità, e per accreditarsi agli occhi del Mondo, la Cina sta portando avanti un programma senza precedenti per raggiungere i migliori standard di sicurezza nel campo atomico[76], sulla scia di quanto già fatto in altri settori, come quello aeronautico. Questo si concreta, ma non si limita, a periodiche ispezioni agli impianti, ricerca di soluzioni innovative, ed implementazione di best-practice. Un esempio di questa politica, si è potuto osservare all'indomani dell'incidente di Fukushima. In quell'occasione, le Autorità, hanno sospeso il processo di approvazione di nuovi impianti, istituendo contemporaneamente una revisione delle procedure per la localizzazioni di questi ultimi, ed uno studio sugli aspetti migliorabili o necessari di modifica relativi alla gestione delle crisi. Parallelamente, è stata portata avanti una campagna di

[74] International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 12

[75] World Nuclear Association, *Nuclear Power in China: Reactor Technology*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013.

[76] World Nuclear Association, *Nuclear Power in China: Regulation and safety – general*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013.

controllo sulla sicurezza dei reattori in funzione ed in costruzione, confluita in un nuovo piano per la sicurezza rilasciato nell'ottobre 2012. Nel documento si è riaffermato che i pilastri del nucleare cinese, rimangono la sicurezza e la qualità dei manufatti realizzati.

E' interessante notare la puntualità di queste iniziative, nonché la validità delle conclusioni a cui giungono le relazioni finali. Si esporranno a questo proposito due esempi. Il primo documento a cui si farà riferimento è un report del 2011[77], a nome dello SCRO, in inglese *State Council Research Office,* l'Ufficio per le Ricerche del Consiglio di Stato. Nel testo, si evidenzia come l'industria nucleare cinese abbia incontrato importanti difficoltà nel limitare il ricorso al supporto esterno, puntando invece maggiormente sul know-how dei sui tecnici al fine di rendere operativi i reattori AP-1000. Si è quindi deciso di aggirare queste problematiche propendendo per la costruzione di reattori CPR-1000 che, considerando un'aspettativa di vita di 50-60 anni, saranno in attività ancora fino al 2070, quando anche i reattori di terza generazioni saranno obsoleti e già sostituiti da quelli di quarta. Alla luce di quanto sta avvenendo, l'SCRO, raccomanda di porre una maggior enfasi nel concentrare gli sforzi per raggiungere, sin d'ora, una maggior indipendenza nello sviluppo e costruzione di impianti di terza generazione da parte dell'industria cinese. Un'altra considerazione interessante che emerge, è la preoccupazione per gli addetti della *National Nuclear Safety Administration*, l'Amministrazione Nazionale per la Sicurezza Nucleare, che sta operando attualmente con un numero di tecnici di circa 1000 unità, quando l'SCRO prevede che questo numero dovrà più che quadruplicare nel 2020, alla luce dell'espansione dell'energia elettronucleare nel paese. Ed a ciò si legano anche le considerazioni in merito alla differenza tra preparazione tecnica degli addetti, e il lasso di tempo maggiore, necessario a sviluppare una cultura della sicurezza.

I punti evidenziati dalle ricerche poi, non sono destinati a rimanere solo sulla carta, ma vi è una volontà di utilizzarli per il miglioramento della sicurezza, e ciò è confermato dagli stanziamenti approvati dal Consiglio di Stato, che prevedono 13 miliardi di $, in tre anni, per affrontare le criticità emerse.

Anche sul versante della ricerca di nuove soluzioni per la gestione di eventuali disastri che potrebbero accadere ai reattori, si stanno portando avanti studi per definire la linee guida da seguire per la loro prevenzione o mitigazione, tenendo in considerazione una pluralità di scenari.

[77] World Nuclear Association, *Nuclear Power in China: SCRO report on nuclear investment and safety*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Uno dei frutti degli sforzi per la sicurezza, intrapresi dalla Cina, è testimoniato dalla fiducia accordata dalla IAEA, all'efficacia del sistema di regolamentazione dell'industria atomica cinese, sia per il presente, che per la sua futura espansione[78].
Si può quindi affermare, che la volontà cinese non è limitata a sviluppare il settore del nucleare, per il solo scopo di sfruttare una fonte energetica relativamente conveniente ma anche, e soprattutto, con l'obiettivo di diventare leader mondiale nel campo, sia per quanto riguarda la progettazione e la costruzione, ma anche per la corretta e sicura gestione degli impianti, a livelli pari, o superiori, a quelli di altri grandi paesi. Inoltre, questa operazione trasparenza, è finalizzata anche a rassicurare i cittadini cinesi, al fine di agevolare i piani di espansione governativi. Infatti, se a livello di governi regionali, vi è grande disponibilità a costruire nuovi reattori, addirittura le proposte avanzate di collocare sui propri territori di compoetenza ammontano a circa 150 nuove unità, gli abitanti, pur ancora in casi isolati, stanno iniziando ad opporsi al nucleare, a causa delle paure sulle possibili ripercussioni sull'ambiente oltre che sulla salute ovviamente. Il caso più recente, è quello della manifestazione di luglio 2013, ad Heshan[79], vicino Hong Kong. In questa occasione, più di mille persone si sono radunate, per opporsi alla costruzione di un impianto per la lavorazione dell'uranio e per la mancanza di una consultazione preventiva degli abitanti locali in merito al progetto, da parte del governo. Il risultato, è stata la rassicurazione ufficiale della cancellazione del progetto, dimostrando che anche l'atteggiamento delle Autorità sta forse cambiando, rispetto al tradizionale pugno di ferro.
A livello nazionale, nonostante non vi siano state altre manifestazioni di ostilità al nucleare, i cinesi paiono aver maggiori dubbi sulla sicurezza degli impianti, dopo quanto accaduto in Giappone. Nonostante ciò, quella cinese, è ancora una tra le nazioni con il più elevato supporto all'energia atomica per la produzione elettrica. Secondo un sondaggio di novembre 2011[80], il 42% degli intervistati ritenevano l'energia nucleare, una fonte relativamente sicura ed importante, e concordavano sulla convenienza di costruire nuovi impianti. Dall'altra parte, il 13% riteneva che si dovesse procedere alla chiusura di tutti i reattori, nel tempo più breve possibile, data la pericolosità intrinseca di questa tecnologia. Il restante 35% che ha risposto al sondaggio, ritiene che la Cina dovrebbe utilizzare gli impianti di cui è già dotata, ma non costruirne di nuovi. Volendo sintetizzare, nel paese asiatico si sta assistendo ad un risveglio della società civile, che sempre più vuole essere coinvolta, fin dalle fasi embrionali, nei

---

[78] International Atomic Energy Agency, *International Nuclear Safety Experts Conclude IAEA Peer Review of China's Regulatory System*, IAEA, http://iaea.org/newscenter/pressreleases/2010/prn201010.html, 30 luglio 2010, ultima consultazione 02/01/2014
[79] Calum MacLeod, *Protesters win environmental battle in China*, Usa Today, <http://www.usatoday.com/story/news/world/2013/07/15/china-evironment-protest/2518221/>, 16 luglio 2013.
[80] Globescan Inc., *Opposition to nuclear energy grows: global poll*, Press Release BBC, 2011, 8

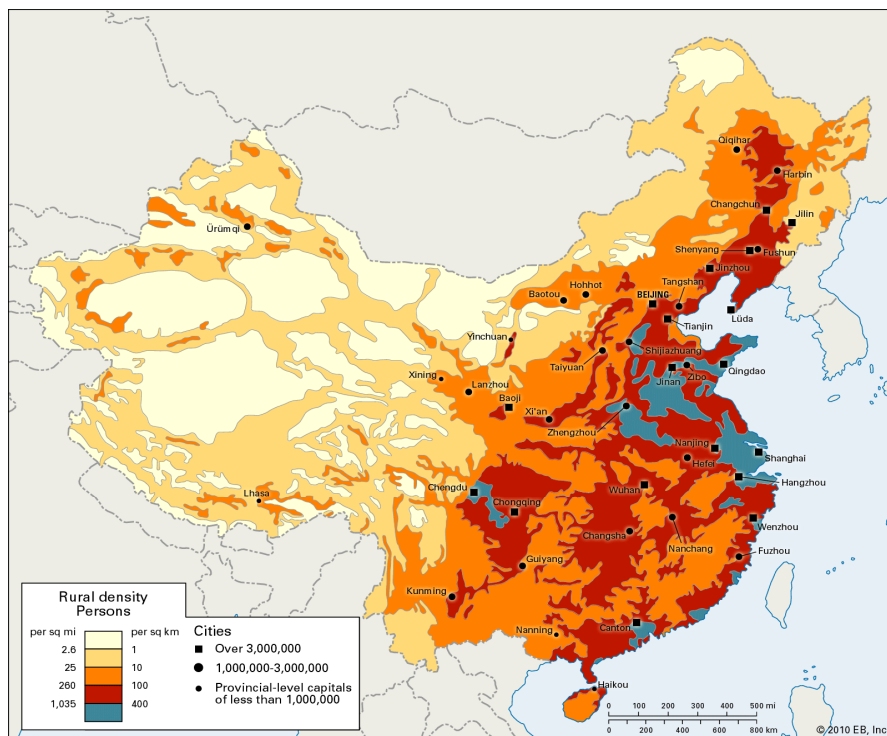
progetti governativi, avendo la possibilità di poter esprimere le proprie istanze di cambiamento, e vuole altresì che queste istanze vengano recepite dai decisori politici.

Nel paese, già ora, vi è una presenza diffusa di organizzazioni non-governative che promuovono il rispetto ambientale, per esempio attraverso la promozione dell'utilizzo dell'elettricità per il riscaldamento delle abitazioni nei centri urbani, in sostituzione del carbone, ma anche molte altre tematiche, e secondo diverse declinazioni. Anche le Autorità governative sembrano interessarsi a questo fenomeno, stabilendo standard e norme per le organizzazioni, anche se rimangono ancora molto ostili nei confronti della promozione dei diritti delle umani o del lavoro.

Se quindi le Autorità, riusciranno ad essere più vicine e ad ascoltare le richieste della società civile, continuando nell'opera di trasparenza già intrapresa, ed a migliorare gli standard di sicurezza, facendo leva sul consenso che già è presente, allora è plausibile che lo sviluppo dell'energia nucleare sia destinato a continuare ed anche ad accelerare. In caso contrario, è probabile che l'ostilità sia destinata ad aumentare, dato che nei piani governativi, molti reattori dovranno essere costruiti nelle regioni con più alta concentrazione industriale, che conseguentemente, presentano anche le più alte densità di popolazione, e quindi più sensibili di altre in caso di incidente, (***Figura 10*** e ***Figura 11).***

FIGURA 10. IMPIANTI NUCLEARI OPERATIVI, IN COSTRUZIONE E PIANIFICATI, IN CINA

Fonte: Wikipedia, *Nuclear power in China: Nuclear Plants in China*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_in_China>, aggiornato 24 aprile 2013.

FIGURA 11. DENSITÀ DEMOGRAFICA CINA

Fonte: Encyclopedia Britannica, *China: population density*, <http://media.web.britannica.com/eb-media/42/105242-050-8332C1FE.gif>, 2010.

L'imporre dall'alto un impianto nucleare, soprattutto in una zona densamente abitata, la cui popolazione potrebbe non essere correttamente informata riguardo ai sistemi di sicurezza ed ai benefici che esso porterebbe, per esempio in termini di riduzione dell'inquinamento, senza consultarla preventivamente, è prevedibile possa portare, e sempre più nei prossimi anni, ad atteggiamenti di rifiuto, anche violenti, anche in considerazione del ritmo di nuove unità elettronucleari in costruzione, ben 29 secondo gli ultimi dati. Questo numero inoltre fa della Cina il paese al mondo, con il più elevato numero di progetti in realizzazione.

Attualmente la maggioranza di questi reattori, sono di tipo CPR-1000 di seconda generazione (+), mentre la seconda tipologia più rilevante è l'AP-1000, costruenda in quattro unità, di terza generazione (+). Altri 6 reattori sono in stadio avanzato nella procedura che porterà ad iniziare la loro costruzione, mentre altri 30 sono pianificati per il prossimo futuro.

Inoltre Areva è impegnata nella costruzione di due reattori EPR da 1660MWe ciascuno, mentre altri due sono pianificati per il futuro.

Altri due reattori di tipo CNP-600, sono in via di realizzazione. Questo design è frutto della cooperazione tra Westinghouse, Areva e CNNC, acronimo di *China National Nuclear Corporation*, società statale di supporto economico allo sviluppo del programma nucleare cinese, ma liberi da proprietà intellettuale straniera.

Per il futuro sono in via di progettazione anche reattori più piccoli e semplificati, di bassa potenza, sempre basati sullo schema PWR, per applicazioni in zone *off-grid* o per fornire energia a specifici processi.
Per quanto riguarda altri design, la Cina è destinataria di proposte per la costruzione di impianti russi VVER, oltre ai due attualmente in costruzione. Sono anche in corso collaborazioni tra CNNC ed AECL, per futuri impianti CANDU-6, ma soprattutto per lo sviluppo di progetti basati sul design *Advanced Candu Reactor*, la sua diretta evoluzione.
In linea con il pensiero russo, anche la Cina ritiene che nel lungo termine sarà strategico basarsi sulla tecnologia di reattori a neutroni veloci, e proprio con la Russia, sono in corso trattative molto avanzate per la costruzione sul territorio cinese di due rettori BN-800. Questo impianto, fornirà riferimenti, insieme ad un piccolo FBR già operativo per scopi di ricerca, per lo sviluppo cinese di un proprio design futuro di potenza nell'ordine di 1GW(e), dovrebbe raggiungere lo stadio inizio costruzione nel 2017.
L'ultima tecnologia che la Cina sta sviluppando è quella dei reattori HTGR, acronimo di *High-Temperature Gas-cooled Reactor*, ossia reattori ad alta temperatura raffreddati a gas. Questa tecnologia è considerata dal Consiglio di Stato cinese, come una di quelle a più elevata priorità di ricerca, da qui ai prossimi 15 anni. Proprio in quest'ottica, due reattori sono già in costruzione, ed andranno a comporre un primo impianto dimostrativo, che dovrebbe raggiungere l'operatività nel 2015. Parallelamente, ad inizio 2013, è cominciata la costruzione del primo impianto specifico per la produzione del combustibile per i futuri HTGR[81].
Questa tecnologia merita un approfondimento, poiché, oltre ad essere una delle soluzioni di quarta generazioni più promettenti, possiede alcune caratteristiche peculiari che potrebbero diventare elementi chiave per la sua diffusione nel mondo.
La dicotomia principale nella filiera HTGR è costituita, da una parte, dai reattori PMR, acronimo di *Prismatic-Block Reactors*, in cui la grafite è utilizzata in blocchi di forma esagonale, e i PBR, o PBMR, *Pebble-Bed Modular Reactor*, oggetto di studio in Cina e che si andranno ora ad analizzare.
In generale i reattori PBR possono essere considerati come reattori moderati a grafite e raffreddati a gas, ma che utilizzano soluzioni innovative rispetto a quelli odierni. La caratteristica peculiare è la forma e la disposizione del combustibile. Al contrario dei reattori tradizionali infatti, i quali utilizzano pellets all'interno di barre che, in fasci, costituiscono gli elementi di combustibile, nei Pebble-Bed, il combustibile è costituito da micro particelle di materiale fissile, come ^{235}U, Pu, Th, disperse in sfere di grafite, materiale che assolve la

[81] World Nuclear News, *Chinese HTGR fuel plant under construction*, <http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Chinese_HTGR_fuel_plant_under_construction-2103134.html>, 21 marzo 2013.

funzione di moderatore. Il nocciolo del reattore è così costituito da migliaia di queste sfere, collocate nel vessel, in cui circola gas a bassa pressione per la sottrazione del calore, che va ad alimentare direttamente una turbina o che prima cede il calore ad uno scambiatore per la generazione di vapore. L'utilizzo del gas, generalmente elio, ha molti vantaggi rispetto all'acqua solitamente utilizzata come fluido del circuito primario, data la sua bassa tendenza a divenire radioattivo ed ad accumulare impurità[82]. Inoltre, non comportando passaggio di stato, si evitano le criticità legate della creazione diretta nel circuito primario di vapore, come avviene nei BWR. Tutto ciò comporterebbe inoltre, una drastica semplificazione del reattore, evitando il complesso di tubature in alta pressione del circuito primario, dal momento che il gas sarebbe libero di circolare all'interno del vessel, raffreddando il nocciolo semplicemente passando tra gli spazi lasciati vuoti tra una sfera ed un'altra, ma anche una conseguente drastica riduzione dei costi, sia in fase di costruzione, sia per la riduzione nei controlli, manutenzione e sostituzione delle tubazioni ed eventuali generatori di vapore, che nei reattori PWR vengono intaccati progressivamente dalle impurità e dalle alte pressioni dell'acqua. Un altro vantaggio è l'operatività elevatissima del reattore, che non richiede fermate per il refuelling. Semplicemente, le sfere di grafite possono essere estratte, testate, e se esauste rimpiazzate con altre nuove, e questo mentre il reattore continua il suo normale funzionamento. Anche dal punto di vista della sicurezza, sono previsti rilevanti miglioramenti. Il design infatti sfrutta un fenomeno fisico che, all'aumentare della temperatura del combustibile, e quindi al rapido movimento degli atomi, genera un aumento della cattura neutronica, che sottrae i neutroni liberi a successive fissioni, cosa che porta ad una conseguente riduzione della potenza del reattore[83]. Come detto, il fenomeno dipende da un fatto fisico, che avviene perciò automaticamente, e non è mediato dall'intervento umano, costituendo così un elemento importante di sicurezza passiva, che garantirebbe al reattore di ritornare ad uno stato di "riposo" e rimanervi stabilmente in caso di incidente od altro evento. A prescindere dalla teoria inoltre, il processo appena accennato, è stato anche dimostrato sperimentalmente infatti, nonostante la classificazione di reattore di quarta generazione, lo sviluppo di questa tecnologia va fatta risalire alla Germania degli anni '50 e successivamente molti altri paesi hanno portato avanti programmi di ricerca sul tema come: gli USA, SudAfrica, Olanda ed appunto Cina. Infine, dal punto di vista commerciale, i PBR, rappresenterebbero un'opportunità di investimento, anche per paesi che non possiedo fin dall'inizio ingenti capitali per grandi complessi di generazione elettronucleare. I pebble-bed sono infatti concepiti come reattori modulari, più piccoli degli attuali, da essere utilizzati in

[82] Massachusetts Institute of Technology, *A future for nuclear energy: pebble bed reactors*, <http://web.mit.edu/pebble-bed/papers1_files/Future%20for%20Nuclear%20Energy.pdf>, 2005.
[83] Massachusetts Institute of Technology, A future for nuclear energy: pebble bed reactors, <http://web.mit.edu/pebble-bed/papers1_files/Future%20for%20Nuclear%20Energy.pdf>, 2005.

numero variabile, in centrali più o meno grandi. Questo darebbe la possibilità di partire con un parco reattori contenuto, che successivamente può essere espanso, a seconda del fabbisogno energetico e della strategia di investimento.

In conclusione, la Cina appare come il paese più fertile per lo sviluppo dell'energia nucleare. La sua determinazione nelle realizzazione dei programmi, con precisi obiettivi da raggiungere, supportati da investimenti rilevanti destinati all'industria e alla ricerca, è prevedibile ne faranno diventare uno dei paesi leader al mondo.
Anche la decisione di instaurare, per la stragrande maggioranza, joint-ventures in posizione di maggioranza, nei rapporti con le imprese estere per la fornitura di componenti e supporto, ha permesso ai cinesi di capitalizzare un ingente know-how nel corso degli anni, che è stato sfruttato per porre le basi per design di reattori, che progressivamente permetteranno all'industria cinese, come già sta avvenendo, di slegarsi dalla tecnologia straniera, e rendersi infine indipendenti per l'intero ciclo del combustibile.
Inoltre, è da apprezzare la volontà di migliorare la sicurezza degli impianti, che risulterà prevedibilmente un fattore essenziale, oltre che per mantenere il favore interno sul nucleare, anche per accreditarsi all'estero in vista dell'esportazione di proprie filiere di reattori. L'incognita che invece il settore cinese deve affrontare, sembra quella di riuscire a formare, in tempi abbastanza ristretti, un numero sufficiente di addetti qualificati per la gestione dei reattori attualmente operativi, e ancor più per quelli che entreranno in servizio nel futuro, anche tenendo in considerazione le diverse filiere presenti nel paese che, seppur basate in massima parte su PWR, hanno design che differiscono a seconda del costruttore. Sarebbe quindi auspicabile una maggior standardizzazione.
Un'ultima criticità da citare, è determinata dalla disponibilità di uranio. Seppur nell'ultimo decennio si sia registrato un aumento delle esplorazioni, attualmente l'estrazione del minerale dalle miniere del paese copre solamente il 25% della quantità richiesta per la produzione di elementi di combustibile. A ciò si aggiunga il basso contenuto di minerale nelle rocce e l'inefficienza del processo da parte dell'industria mineraria. Questo potrebbe divenire un pesante freno all'espansione del nucleare, che necessiterà via via sempre più combustibile nel futuro. Sarà quindi necessario mettere in campo strategie per aumentare la quantità estratta, attraverso maggior efficienza e sfruttamento di nuovi giacimenti, ma anche portare avanti i progetti relativi alla chiusura del ciclo del combustibile, aumentando il reprocessing e studiando metodi di recupero non convenzionale dell'uranio, pena una sempre maggior dipendenza dalla importazioni.

VISIONE D'INSIEME DEL NUCLEARE DI QUARTA GENERAZIONE

I reattori di quarta generazione sono costituiti dalle soluzioni che sono attualmente in fase di studio e che saranno disponibili sotto forma di impianti commerciali intorno al 2030.
Le due macro-categorie che la compongono sono costituite da:

1. reattori termici: che utilizzano neutroni lenti, quindi moderati
2. reattori veloci: che utilizzano neutroni veloci

<u>Della prima fanno parte:</u>

- VHTR, *Very High Temperature Reactor*, che già si è avuto modo di esporre approfonditamente con la trattazione della tipologia "Pebble-bed".
- SCWR, ossia *Super-Critical Water-cooled Reactor*, reattori che combinano le caratteristiche dei BWR, ma con fluido termovettore costituito da acqua ad elevata pressione, come nei PWR. La peculiarità rispetto ai reattori LWR attuali, è data dalla supercriticità dell'acqua, che circola nel circuito primario senza subire cambiamento di stato, ossia passaggio da stato liquido a vapore sotto riscaldamento, durante il ciclo. L'interesse per questa tecnologia è costituito dalla maggior efficienza termica rispetto ai LWR attuali pur attingendo a soluzioni ormai affidabili e consolidate di questi ultimi, e la maggior semplicità dell'impianto, fattore che permetterebbe di contenere i costi e generare energia a prezzi inferiori.
- MSR, acronimo di *Molten Salt Reactor*. Sono reattori in cui il fluido del circuito primario è un composto di Sali fusi che circolano nel reattore sottraendovi calore, mentre gli elementi del combustibile sono costituiti da micro-particelle fissili inglobate in grafite. Altri design prevedono che il fissile sia disperso in un sale fuso, e che la reazione si origini in seguito al passaggio in un nucleo realizzato in grafite che assolva anche alla funzione di moderatore.

  <u>Della seconda fanno invece parte:</u>
- GFR, Gas-cooled Fast Reactor, reattore FBR, raffreddato ad elio. Il gas, una volta riscaldato, circola direttamente nelle turbine per produrre elettricità. Anche questa tecnologia è caratterizzata da elevata efficienza termica, rispetto ad i reattori attualmente operativi.
- SFR, esteso in *Sodium-cooled Fast Reactor*. Reattore FBR, alimentato ad uranio e plutonio, in cui il fluido termovettore è costituito da sodio liquido. Questa caratteristica dà la possibilità di operare con pressione del circuito primario vicina a quella atmosferica,

anche se si rilevano rischi per le caratteristiche proprie del sodio di incendiarsi spontaneamente in acqua, nonché criticità per la corrosività per le strutture.

Tre le opportunità interessanti del progetto, vi è la sua sicurezza passiva: il design fa si infatti, che la reazione del nucleo rallenti all'aumentare della temperatura oltre i limiti previsti. Inoltre un altro punto di forza si può trovare nella capacità di "consumare" i prodotti transuranici (elementi con numero atomico, ossia numero di protoni superiori ai 92 dell'uranio), alcuni dei quali sono altamente tossici e con emivita molto lunga, che in alternativa dovrebbero essere trattati come scorie.

Di questa categoria fanno parte reattori che sono, o sono stati operativi, come il francese Superphenix, ed il russo BN-600.

- LFR, *Lead-cooled Fast Reactor*. Come indica il nome, sono reattori raffreddati a piombo fuso o sue leghe, che circolano tramite la naturale convezione. Il combustibile è uranio fertile ed altri elementi transuranici, come per esempio Pu ed altri. Sono caratterizzati, elemento comune anche agli altri FBR, da lunghi periodi di operatività tra una ricarica e la successiva, permettendo quindi di essere collocati, in piccoli impianti, anche in luoghi remoti, e risparmiando sui costi di refuelling.

DECOMMISSIONING

Un impianto nucleare, al pari di altri impianti convenzionali per la produzione elettrica dopo decenni di attività, giungono ineluttabilmente ad un'età in cui non è più economicamente conveniente mantenerli in vita. Questa vita operativa, in linea generale, senza considerare eccezioni per determinate tipologie di reattore, si aggirava intorno ai 30 anni per gli impianti costruiti fino agli anni '70/'80, anche se molti di questi ancora operano a seguito di interventi di ammodernamento e miglioramento della sicurezza, mentre quelli più recenti, hanno aspettative di vita dai 40, e molto più spesso 60 anni[84].

Le installazioni nucleari quindi, dovrebbero seguire tre fasi principali: progettazione e costruzione, esercizio e decommissioning. Questo ultimo termine racchiude in se tutte le procedure finalizzate allo smantellamento parziale o totale del sito, al fine di giungere ad uno stato in cui non si pongano più pericoli radiologici[85].

A quel punto, sarà possibile rimuovere tutti, od alcuni dei controlli normativi che interessano il sito, garantendo la sicurezza futura della popolazione e dell'ambiente. Sarà quindi possibile restituire alla collettività parte, o il territorio nel suo complesso, ove insisteva un tempo l'impianto, concedendo l'utilizzazione degli edifici eventualmente rimasti e delle aree verdi, per nuove attività. Comunemente il termine decommissioning fa riferimento all'opzione in cui, dopo aver messo in sicurezza l'impianto, si procede all'allontanamento del combustibile, seguito dallo smantellamento progressivo degli impianti, parallelamente a processi di decontaminazione, che portano al confinamento dei rifiuti radioattivi che verranno successivamente trattati e stoccati. Una volta liberato il sito da vincoli radiologici si può procedere all'abbattimento delle strutture esterne ancora presenti con mezzi convenzionali, liberando l'area per successivi usi, raggiungendo in parte dei casi ad una condizione di cosiddetto *green-field*, prato verde. Per strutturare meglio il processo si può dire che il termine decommissioning racchiude in se tre opzioni che si possono attuare, a seconda della tempistica che si intende seguire[86]. La prima, il DECON, fa riferimento alla strategia che prevede lo smantellamento immediato dell'impianto alla cessazione della sua operatività, attraverso decontaminazione e successiva demolizione, e trattamento dei materiali prodotti per essere trasportati, ed infine stoccati, in un sito idoneo. La seconda, il SAFESTOR, nello smantellare le parti diverse dal locale reattore, allontanando il combustibile irraggiato e drenando i liquidi, lasciando lo smantellamento definitivo ad un periodo successivo,

---

[84] World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013.

[85] Redazione Arparivista, *Il decommissioning in Italia e nel mondo*, in *ArpaRivista*, n°5, 2009, 16

[86] World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities: Decommissioning Options*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013.

nell'ordine di 30-50 anni, al fine di permettere il decadimento naturale, con lo scopo di ridurre la quantità di materiali radioattivi da trattare successivamente. L'ultima opzione consiste nell'ENTOMBMENT. Quest'ultima, prevede di ridurre il più possibile il volume delle strutture e l'allontanamento per quanto è possibile, dei materiali contaminati per procedere successivamente a rinchiudere le strutture sopravvissute in altre nuove in materiali stabili, durevoli e resistenti, come acciaio e cemento, con l'obiettivo di garantire la sicurezza del sito per un periodo tale che la radioattività permetta la rimozione dei controlli normativi. Fino a quel momento, la struttura verrà sorvegliata e periodicamente manutenuta. L'esempio più estremo di un'operazione di ENTOMBMENT, e peraltro solo parziale data l'estensione del complesso e le problematiche esistenti, è sicuramente quello effettuato presso il reattore 4 di Chernobyl durante il 1986. In quel caso le operazioni furono portate avanti come misura di emergenza, in condizioni estremamente precarie e rischiose con lo scopo di ridurre la dispersione di materiali radioattivi nell'ambiente e non con l'obiettivo di costruire una struttura che potesse resistere per un lungo periodo. Il nuovo progetto della sovrastruttura di contenimento invece, rientra a pieno nella definizione di ENTOMBMENT che, almeno secondo le stime, dovrebbe garantire la sicurezza del sito per un periodo relativamente lungo.
Come già accennato, salvo i casi in cui la strada risulta obbligata, delle tre opzioni può essere percorsa ora l'una, ora l'altra. Non è detto infatti che la demolizione immediata ed il raggiungimento del green-field risulti la strategia più sicura, economica ed efficace. In alcuni casi può essere preferibile procedere al SAFESTOR, ed attendere il tempo necessario affinché buona parte dei prodotti di fissione decada naturalmente, permettendo così un successivo più agevole intervento degli addetti al futuro smantellamento, riducendo anche i rischi a cui potrebbero essere esposti. Inoltre si tenga presente che il 99% della radioattività totale, in presenza di integrità dell'impianto, è confinata nel vessel ed in particolare nelle barre di combustibile. Altri importanti rischi radiologici, data l'emissione di radiazioni gamma, possono derivare dai materiali soggetti ad attivazione neutronica che comunque, presentano tempi di decadimento brevi, misurati in alcuni anni. Ciò sottintende che buona parte dell'impianto, una volta arrestato, può essere demolito con procedure convenzionali e con rischi molto bassi di rilascio di inquinanti nell'ambiente. Si pensi per esempio alle torri di raffreddamento, tubazioni del circuito secondario di raffreddamento, ecc. E' chiaro che una strategia di SAFESTOR comporta l'indisponibilità, per periodo di tempo maggiore, rispetto al DECON, del sito, e costi maggiori di sorveglianza dato il periodo più prolungato per cui essa è necessaria, ma presenta anche costi inferiori rispetto a quelli di DECON in altri frangenti. Nel caso dello smantellamento immediato infatti, si dovranno utilizzare apparecchiature per la gestione a distanza dei materiali radioattivi, in misura superiore, dato che non si può

avvantaggiarsi dal naturale decadimento degli elementi, inoltre il volume di rifiuti tenderà ad essere maggiore.

Ad agosto 2013, i reattori nel mondo in cui risultano cessate le operazioni erano così ripartiti[87]: 102 quelli commerciali, 46 sperimentali o prototipi ed oltre 250 tra reattori di ricerca ed altri impianti correlati al ciclo del combustibile. Di questi 15 reattori sono stati smantellati completamente, ed altri 51 stanno seguendo lo stesso destino, mentre altri 48 stanno seguendo processi di custodia protettiva passiva, termine che indica SAFESTOR. Altri tre hanno subito un processo di intombamento, mentre dei rimanenti se ne sta decidendo il futuro. E' però interessante andare ad analizzare il motivo della cessazione delle attività di questi impianti, da momento che ciò può essere un fattore rilevante per l'opzione di decommissioning da seguire nel breve-medio periodo. Un numero rilevante, 102 reattori, è stato chiuso nel corso degli anni perché ritenuto non più economicamente vantaggioso. Di questo gruppo fanno parte essenzialmente i primi reattori sperimentali e i seguenti primi reattori commerciali, per la maggior parte entrati in attività prima degli anni '80. Non deve quindi stupire la numerosità, dato che si parla di impianti costruiti nei primi decenni dell'era nucleare, in cui la tecnologia era in continuo sviluppo ed il know-how ancora limitato. In ogni caso, quasi la metà di questi reattori ha raggiunto le aspettative di vita previste da progetto. Altri 25 reattori, a cui si devono aggiungere gli ulteriori otto chiusi dalle Germania nel 2011, hanno cessato le operazioni per decisione politica. Ciò significa che non sussisteva, una fondata ragione tecnica od economica che impedisse la continuazione della produzione nel sito. Queste chiusure sono quindi da ricondursi a particolari momenti storici in cui l'avversione al nucleare è stata più forte da parte dei governi in carica nei vari paesi o da parte dell'opinione pubblica. Il caso più eclatante è sicuramente quello più vicino a noi, e già accennato, della moratoria 2011 emanata dal governo tedesco in conseguenza dei fatti di Fukushima Dai-ichi ma, andando indietro nel tempo, rimanendo in Italia, anche i tre impianti di Trino, Caorso e Latina, furono chiusi a seguito di una decisione politica, innescata dal primo referendum sul nucleare. Anche la pressione internazionale nei confronti di un altro paese che opera impianti nucleari considerati pericolosi, soprattutto se a quest'ultimo vengono concessi finanziamenti per perseguire tali obiettivi, può spingere il paese ad intraprendere la strada del decommissioning. A questa fattispecie possono essere ricondotti gli spegnimenti dei reattori sopravvissuti di Chernobyl e, più recentemente, il secondo reattore della centrare di Ignalina, in Lituania, nel 2009.

[87] World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities: Reasons for shutdown*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013.

L'ultima categoria, e la meno popolata, è costituita dai reattori arrestati a seguito di incidente. Di questo gruppo fanno chiaramente parte i reattori che hanno subito gli eventi più gravi della storia dell'industria nucleare, come quelli di Dai-ichi, quello di Chernobyl-4 e di Three Miles Island-2. Degli undici reattori di questo gruppo, la maggior parte dei reattori ha subito fusioni del nocciolo di varia gravità, i rimanenti altri danni di minore interesse. La sorte finale degli impianti più danneggiati si conoscerà solo fra decenni, quando le condizioni ambientali permetteranno di meglio valutare le possibilità di intervenire nelle zone più contaminate, e in questo giocherà un ruolo fondamentale anche l'evoluzione della tecnologia.
Negli ultimi decenni comunque, è stata capitalizzata una rilevante esperienza in termini di decommissioning che continuerà ad aumentare nel futuro. Il fattore di criticità più rilevante è costituito dai numerosi design di reattore costruiti, che necessitano di progettare soluzioni ad hoc, nella maggior parte dei casi a livello di singolo impianto, determinando spesso un allungamento delle tempistiche ed un aumento dei costi rispetto agli studi preliminari. Anche l'età delle strutture su cui si deve intervenire gioca un ruolo importante per permettere di operare in sicurezza. Se ciò non risultasse possibile, a monte del processo di smantellamento sarebbero necessarie opere di stabilizzazione ecc.
In Europa, così come nel resto del Mondo, le due opzioni più utilizzate per il decommissioning sono il DECON, ed il SAFESTOR. Quest'ultimo protocollo è attualmente quello preferito da Francia, Regno Unito, Spagna e Germania, anche se roprio quest'ultima nazione ha dato prova che anche la via del DECON è praticabile, quando nel 1995 ha rilasciato l'autorizzazione all'utilizzo agricolo, del terreno su cui insisteva la centrale bavarese di Niederaichbach. E' chiaro che la pratica dello smantellamento completo ed immediato sia più facilmente attuabile, dati anche i minori rischi, nel caso di vessel di piccole dimensioni, ed ancora più se essi possano essere rimossi dall'edificio di contenimento senza la necessità di essere sezionati. Nel caso di impianti più grandi, con reattori di grosse dimensioni, ciò diventa impraticabile, e le necessarie attività di taglio e rimozione, spingono all'aumento dei tempi e dei costi.
Sono gli Stati Unite invece, ad aver dato prova in diverse occasioni della possibilità di poter ripristinare l'area degli impianti ad uno stato molto vicino a quello originario, anche nel caso di reattori di dimensioni standard. Un primo esempio[88] in tal senso, è la struttura di *Rancho Seco*, PWR da 913MW(e), chiusa nel 1989, nel 2009 aveva raggiunto lo stadio finale di smantellamento, liberando un'area sulla quale insisteva pari a meno del 10% per un deposito temporaneo di scorie. Un esempio ancora più interessante, è quello di *Shipping Port*, reattore

[88] World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities: Decommissioning Experience*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013.

commerciale che, in 7 anni, ha subito un totale smantellamento, restituendo un area libera da rischi radiologici. Anche impianti più grandi, come *Trojan*, 1180MW(e), hanno raggiunto lo status di green-field, salvo una area limitata per il confinamento delle scorie in attesa di un loro futuro trasporto verso un centro nazionale di stoccaggio definitivo.

Dai casi appena visti quindi, si rileva come la tecnologia e l'esperienza accumulata abbia raggiunto livelli tali per cui le pratiche di dismissione, anche degli impianti più grandi, sono oramai consolidate ma che comunque non è pensabile definire una strategia di decommissioning senza definirne una per la gestione dei rifiuti radioattivi. Si deve quindi prendere una decisione, prima ancora di andare ad intervenire su di un impianto, sulla via che dovranno prendere i rifiuti che verranno prodotti. In questo campo, gli approcci dei vari paesi europei sono diversi, ed essi sono anche mutati, per uno stesso paese, nel corso del tempo. Francia e Regno Unito, hanno sempre seguito la via del reprocessing per recuperare gli elementi riutilizzabili, e la conseguente vetrificazione dei rifiuti rimanenti. Anche la Germania inizialmente si affidava all'esperienza francese ed inglese per il ritrattamento del suo combustibile, mentre dal 2005 considera direttamente un rifiuto gli elementi irraggiati e li tratta come tali, non sottoponendoli a ritrattamento e prevedendo centri di stoccaggio di medio-lungo termine, postponendo la decisione sul loro futuro, strada seguita anche da altri paesi europei. Anche gli Stati Uniti, seppur uno dei paesi leader nel reprocessing, dal 1992 ha abbandonato completamente questa procedura, attendendo la decisione per un sito nazionale di stoccaggio geologico delle scorie[89], nelle speranze, definitivo, dopo la recente decisione di cessare le operazione in quello di Yucca Mountain.

L'Italia è invece il paese che appare più dubbioso sul tema. Dopo una prima fase in cui il combustibile irraggiato veniva trasportato nel Regno Unito per essere ritrattato, ne è seguita un'altra in cui la strategia scelta era quella dello stoccaggio a secco, per ritornare infine sulle proprie scelte, e decidere per il reprocessing in impianti francesi[90].

In qualsiasi caso, seppur con implicazioni sul volume totale, risulta quindi centrale il tema della gestione dei rifiuti che residuano dalle attività di decommissioning, anche se in parte sottoposti a riprocessamento. Come si è visto, molte programmi di DECON negli Usa, comportano che parte dei materiali, costituenti rischio radiologico, rimangano sul sito anche dopo che questo venga rilasciato ad altra destinazione. Ciò è dovuto alla mancanza di un'altra opzione esistente da intraprendere. L'alternativa teorica, e la più efficace ed efficiente, sarebbe costituita dalla creazione di centri nazionali per lo stoccaggio dei rifiuti. Anche l'Italia si trova nella medesima condizione. Attualmente infatti, i rifiuti radioattivi sono

[89] Alfredo Luce, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 19
[90] Ibidem, 19

stoccati presso gli impianti che nel corso degli anni li hanno prodotti. I siti sono localizzati lungo tutta la penisola[91], anche se al momento della loro costruzione, non erano stati pensati per queste attività, e in aggiunta va anche considerato che lo stoccaggio da temporaneo che lo si era inizialmente considerato, e conseguentemente, con le strutture concepite per periodi di tempo limitati, si stanno trasformando in depositi a tempo indeterminato. Questi ultimi, oltre ad essere soggetti ad obsolescenza, sono altresì numerosi, cosa che implica la necessità di mantenerne la sorveglianza costante da parte di un nutrito numero di addetti. A questa situazione si aggiunga che i rifiuti spediti in Inghilterra e Francia, al più tardi entro il 2025, seppur trattati, dovranno necessariamente, in linea con gli accordi stipulati, ritornare in Italia. Questo comporta la necessità di arrivare alla realizzazione fisica di un deposito per questi materiali entro il 2020, che risulterebbe anche una perfetta soluzione per i materiali provenienti dal decommissioning delle installazioni italiane, ma anche di quelli derivanti dall'annuale produzione medica, industriale e di sperimentazione. L'argomento della gestione dei rifiuti appena introdotto, necessita comunque di essere approfondito, infatti i materiali provenienti da decommissioning e da altre attività, possono avere livelli di radioattività molto diversa, e tra questi, il rischio per l'ambiente e le persone varia in maniera esponenziale. Il tema della classificazione e gestione dei rifiuti radioattivi verrà comunque rimandato ad un prossimo capitolo specifico, dato il volume di informazioni da presentare.

Il processo di decommissioning comporta, oltre a quanto finora detto, la necessità di reperire fondi sufficiente per il suo finanziamento. Nella maggior parte dei paesi nel Mondo, sono le stesse utility che gestiscono gli impianti, o in alternativa i legali proprietari, ad essere responsabili dei costi legati al processo. L'accantonamento dei fondi necessari può essere effettuata in vari modi, tra cui i principali[92] risultano:

1. la costituzione preventiva di capitali destinati alle operazioni future, che diverranno disponibili una volta raggiunta la conclusione della vita dell'impianto,
2. il prelievo di una percentuale dalle entrate derivanti dalle bollette pagate dai consumatori durante la vita dell'impianto, che andranno anch'essi a costituire un fondo disponibile in futuro,
3. in ultimo, la sottoscrizione di polizze assicurative, che trasferiscano l'obbligazione in capo ad un istituto bancario, garantendo i capitali necessari anche in presenza di insolvenza da parte dell'utility.

[91] Alfredo Luce, Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 28

[92] World Nuclear Association, Decommissioning Nuclear Facilities: Cost and Finance, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013.

L'importo dei fondi è rivisto ad intervalli regolari, che vanno normalmente da uno a cinque anni, ed è approvato dal governo o dalle autorità di controllo competenti. A seconda delle norme vigenti nei diversi paesi poi, può essere concesso l'accantonamento e la gestione dei fondi anche da parte degli stessi operatori degli impianti, sotto un'adeguata supervisione, oppure la sola raccolta, con la gestione di questi ultimi lasciata in capo ad organismi separati ed indipendenti. Nel caso di impianti nucleari per i quali non è stata scelta fin dall'inizio una fonte di finanziamento, cosa comune per i primi impianti di ricerca, ma anche per quelli commerciali di prima generazione, i costi di dismissione sono generalmente a carico dello Stato, il quale fa fronte agli stessi di solito, attraverso l'imposizione fiscale o altri contributi gravanti sulla collettività generale. Negli Usa il metodo più utilizzato risulta quello del contributo in bolletta, che pesa nell'ordine di 0,1-0,2 c$/KW(h), e sembra essere un'opzione efficace dal momento che quasi i 2/3 del totale dei fondi previsto come necessario per il decommissioning di tutti i reattori statunitensi è già stato accantonato, residuando una cifra di circa 9 miliardi di $, che verrà progressivamente a ridursi nel tempo, grazie all'operatività degli impianti in funzione. Più in generale, i timori che qualcuno alimenta, secondo cui i costi per il decommissioning siano più elevati di quelli per la costruzione degli impianti, risultano totalmente infondati alla luce delle ricerche. Un documento dell'Organizzazione Europea per la Cooperazione e lo Sviluppo, datato 2003[93], delinea infatti costi inferiori a quelli di costruzione, pur con rilevanti divari tra loro, determinati della filiera di reattore da smantellare, condizioni, grandezza dell'impianto ecc. In linea generale, per singolo kW(e) di potenza, molti PWR di concezione occidentale, ricordiamo, la tecnologia attualmente più presente a livello globale, necessitano tra i 200 ed i 500$. Il prezzo è in linea con i VVER, il cui costo è intorno ai 330$. La cifra necessaria per un CANDU può variare dai 270 ai 430$, mentre quella per i BWR, tra i 300 ed i 550$. Altre tipologie particolari di reattori possono avere costi superiore, soprattutto in funzione della quantità di materiale radioattivo da smaltire. Le stime suggeriscono che modelli di primissima generazione come i Magnox, possano avere un costo che si aggira su 2600$/kW. Nonostante le eccezioni, la pratica del decommissiong sembra una via percorribile, ed ancora di più lo sarà nel futuro, con l'aumento degli impianti da dismettere, sfruttando anche l'esperienza acquisita. Questo permetterà una riduzione dei costi, come già nelle previsioni di molte utilities negli Stati Uniti.

La pratica del decommissing inoltre, deve essere vista anche in un'ottica di responsabilità verso le generazioni future, liberandole dal peso di dover gestire un'eredità che può apparire ingombrante. Quest'idea è sicuramente meritoria, e dovrebbe essere sempre ben tenuta a

[93] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency, *Decommissioning Nuclear Power Plants - policies, strategies and costs*, Parigi, OECD, 2003, 59-62

mente, tuttavia, sempre in un'ottica di responsabilità, e con questo sottintendendo un programma a tappe predefinite con precisi obiettivi da raggiungere, ben scadenzato e supportato dai capitali economici necessari, potrebbe risultare più efficace differire le operazioni di smantellamento dei siti, mettendoli in una condizione di SAFESTOR, con eliminazione delle strutture non o debolmente contaminate, per poi attendere un tempo di qualche decina d'anni prima di procedere ai successivi interventi. Questa via è la più praticata in Europa, e può garantire una riduzione dei costi, tanto maggiore quanto più la radioattività diminuisce naturalmente nel tempo.

Fino a questo momento, si sono visti gli approcci generali di alcuni paesi europei alla dismissione degli impianti, ed i risultati conseguiti, soprattutto negli Usa. Ci si concentrerà ora sulla situazione italiana.

Come già si è avuto modo di citare, la strategia italiana, soprattutto in tema di gestione dei rifiuti, non è stata sempre coerente. A tutt'oggi, nonostante siano fatti passi in avanti, la situazione nel paese presenta delle criticità.

L'inzio della discussione in tema di decommissioning, deve essere fatta risalire alla fine degli anni '80. Negli anni successivi il referendum del 1987, le centrali italiane in attività sono state progressivamente arrestate, definitivamente. A quel punto doveva essere deciso, dato che una strategia preventiva in tal senso non era stata definita, il destino di questi siti. Dopo una prima fase, in cui la strada del SAFESTOR, con il mantenimento in sicurezza degli impianti per un periodo non inferiore ai 50 anni era stata preferita, si è successivamente optato per una di DECON accelerato, da portarsi avanti su un periodo di 20 anni. Durante gli anni '90 si è proceduto a definire, in collaborazione anche con gli enti locali, un indirizzo per la gestione dei rifiuti, derivanti dalle dismissioni dei siti. Bisognerà però attendere fino alla fine del decennio, ed in particolare la fine del 1999, per conoscere la strategia nazionale, definita all'interno del documento dal titolo: "*Indirizzi strategici per la gestione degli esiti del nucleare in Italia*". Nello scritto vengono esposti le linee guida e gli obiettivi generali per giungere, alla fine del processo, allo smantellamento completo degli impianti italiani. Brevemente, gli obiettivi individuati, da conseguire in parallelo, sono stati tre[94]: il primo, trattamento dei rifiuti radioattivi, al fine renderli stoccabili temporaneamente sui siti di produzione, rendendoli idonei al trasporto verso un futuro Deposito Nazionale da approntare. Per il combustibile irraggiato in particolare, sussistevano le opzioni di stoccaggio in sito o di ritrattamento all'estero.

[94] Alfredo Luce, Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 23-26

Il secondo obiettivo, consisteva nella realizzazione del Deposito Nazionale, per lo stoccaggio dei rifiuti a media e bassa attività, derivanti dalla fase di trattamento precedente. Inoltre il sito doveva nelle intenzioni, contenere temporaneamente i rifiuti ad elevata attività, in attesa di una decisione sulla sorte definitiva degli stessi. Nelle intenzioni, disattese, questi primi due obiettivi sarebbero dovuti essere raggiunti entro il 2010. Essenzialmente, una volta individuato un Deposito Nazionale, la via per lo smantellamento definitivo delle installazioni nucleari italiane, avrebbe avuto una spinta importante aprendo prospettive molto positive di essere completato nei tempi previsti. La conseguenza più rilevante di questo piano, è stata la creazione, con decreto 7 maggio 2001 di Sogin S.p.a., acronimo di *Società Gestione Impianti Nucleari*. Quest'ultima, leggendo dal profilo aziendale[95], è una società pubblica, interamente partecipata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze, che opera in base agli indirizzi strategici del Governo Italiano. Lo società è responsabile della bonifica ambientale dei siti nucleari italiani, e della gestione dei rifiuti radioattivi, compresi quelli derivanti dall'industria, medicina e dalla ricerca. Parimenti, Sogin è anche incaricata delle realizzazione di un Deposito Nazionale di superficie, opera, che nelle intenzioni dovrebbe inserirsi in un progetto più ampio che va sotto il nome di *Parco Tecnologico*, nel quale condurre ricerche avanzate nel campo del decommissioning e gestione rifiuti radioattivi. L'attuale assetto societario, prevede dal 2004, che Sogin possieda una quota di maggioranza in Nucleco S.p.a., operatore nazionale incaricato della raccolta, condizionamento e stoccaggio temporaneo di rifiuti e sorgenti radioattive provenienti da attività di medicina nucleare e di ricerca scientifica.

Come è apparso subito chiaro da questi primi provvedimenti, il nodo della discordia sarebbe stato costituito dalla localizzazione del futuro Deposito Nucleare. La creazione di un Gruppo di Lavoro sul tema aveva proprio lo scopo di individuare le linee guida per approfondire le tematiche relative ed assicurare un dialogo ed un coinvolgimento del pubblico, nonché per raggiungere una decisione concertata sul territorio in cui il futuro deposito avrebbe dovuto insistere. Le conclusioni a cui giunse il Gruppo di Lavoro, sono state però ignorate a seguito degli eventi di settembre 2001, e più in generale le tensioni globali in termini di terrorismo, e si decise successivamente, di agire per via di decreto, DPCM 14 Febbraio 2003, "*Dichiarazione dello stato di emergenza in relazione all'attività di smaltimento dei rifiuti radioattivi dislocati nelle regioni Lazio, Campania, Emilia-Romagna, Basilicata e Piemonte, in condizioni di massima sicurezza*" (reiterato, con successivi DPCM, fino al 31/12/2006). Questa mossa, darà la possibilità, come spesso si è utilizzata, ed ancora si utilizza nella prassi italiana, di nominare il Presidente della Sogin, Commissario Delegato, conferendogli in

[95] Sogin S.p.a., Company Profile, Roma, Relazioni Esterne Sogin, 2012, 5,7,8,11

questa maniera ampi poteri di deroga alla vigente normativa, senza peraltro che questo portasse ad un'accellerazione nell'affrontare le problematiche conosciute.
Risale al 2003 anche il decreto n° 314, e le conseguenti manifestazioni di opposizione delle popolazioni interessate, che vedeva nel territorio di Scanzano Ionico, quello in cui sarebbe dovuto sorgere il nuovo Deposito Nazionale. La prevedibilità di questa ostilità, cosa che peraltro il Gruppo di Lavoro riunito qualche anno prima aveva cercato di anticipare, lascia abbastanza sconcertati, dal momento che appare ovvio che una decisione di questa importanza non possa essere imposta per decreto ed ancor più con un colpo di mano, senza una concertazione con gli abitanti interessati. La successiva conversione in legge del decreto, n° 368/2003, ancora più prevedibilmente, vede la scomparsa della località di Scanzano, attribuendo semplicemente a Sogin il compito di costruire un deposito per i rifiuti di terza categoria, il significato di questa classificazione verrà spiegato nella prossima parte, entro e non oltre il 31 dicembre 2008, senza però definirne la localizzazione, cosa che sarebbe dovuta essere responsabilità di un mai individuato commissario straordinario. Gli ultimi movimenti legati alla vicenda, vedono la legge n° 239/2004 individuare la necessità di realizzare un deposito definitivo per i rifiuti di seconda categoria, utilizzando l'iter della precedente legge n° 368/2003, anche qui prevedibilmente, con gli stessi risultati, ossia nulli. Come detto all'inizio di questa saga, lo stato di emergenza decretato nel 2003, è stato rinnovato, sempre con decreto fino al dicembre 2006. Il successivo cambio di compagine governativa, non ha ritenuto sussistessero ancora le condizioni di emergenza per i rifiuti radioattivi italiani e non ha prorogato il decreto.
Al 2007, i lavori di decommissioning, aveva raggiunto uno stadio di completamento del 9% sul totale, mentre il Deposito Nazionale era uscito dall'agenda governativa italiana.
A fine 2012, si prevedeva da parte di Sogin di giungere al green-field per i tre siti di Trino Vercellese, del Garigliano e di Caorso, tra il 2024 ed il 2026. Per la centrale di Latina il termine è invece fissato al 2035[96]. Questi obiettivi si inseriscono in un programma più ampio, in cui Sogin, smantellerà anche altri impianti afferenti al ciclo del combustibile ed alla manipolazioni di elementi radioattivi, come per esempio le strumentazioni dell'impianto IPU della Casaccia, nonché provvederà alla gestione di siti di stoccaggio presenti sul territorio italiano. Sogin, per queste attività, può contare su un budget complessivo di circa 6,5 miliardi di €, necessari, oltre che per la messa in sicurezza dei siti e per la loro bonifica, anche alla copertura dei costi di reprocessing all'estero e, per la quota più rilevante, quasi il 40%, per la costruzione del Deposito Nazionale all'interno del Parco Tecnologico[97].

[96] Giuseppe Nucci, *La bonifica ambientale dei siti nucleari*, presentazione all'interno del Workshop AIN, 8 novembre 2012, Roma, Associazione Italiana Nucleare, 2012, 3
[97] Ibidem, 5

Allo stato attuale, basandosi sul quanto pubblicato dal sito internet di Sogin S.p.a., i lavori nelle ex centrali italiane si stanno concentrando maggiormente sulle strutture di supporto delle centrali, più che sulle zone “calde”.

Per Trino[98], la situazione odierna presenta il seguente avanzamento: sono state rimosse le torri di raffreddamento ausiliarie ed i trasformatori, sono stati conclusi i lavori di smantellamento dei componenti il locale turbine principale ed ausiliari, nonché la decontaminazione dei generatori di vapore. Ad esclusione di altri lavori minori di smantellamento convenzionale di strutture, il processo si sta concentrando sulla decontaminazione del locali all’interno degli edifici del complesso. Sono inoltre state completate le attività di compattazione dei rifiuti già presenti, ma nella piscina del sito rimangono ancora 15 tonnellate di combustibile irraggiato.

Nella stazione piacentina di Caorso[99], ciò che risulta effettuato è la decontaminazione del circuito primario, rimozione delle turbine, smantellamento delle torri di raffreddamento ausiliarie. E’ stata inoltre completata la rimozione degli elementi coibentanti che, come era uso all’epoca, erano costituiti da amianto, problematica non radiologica che si deve affrontare nella maggior parte degli impianti, anche convenzionali, costruiti prima degli anni ’90. A dicembre 2012 è partita la gara per la progettazione degli interventi di rimozione dei componenti dell’edificio reattore. Il sito ospita, come negli altri casi, un deposito per lo stoccaggio dei rifiuti a bassa e media intensità, mentre nell’estate 2010 si è concluso il programma di trasporto verso la Francia, per il riprocessamento, del combustibile irraggiato.

Gli interventi più rilevanti nella centrale di Latina[100], per la quale bisogna tenere in considerazione la tipologia, *Magnox*, su cui risulta particolarmente complesso intervenire, come si è peraltro potuto intuire osservando l’entità dei costi del decommissioning rispetto ad altre filiere, sono quelle della demolizione dell’edificio turbine e suo contenuto, di parte del circuito primario di raffreddamento, del lungo pontile che si estendeva verso il largo, oltre alla rimozione del complesso macchinari per il caricamento e rimozione del combustibile all’interno del locale del reattore. Altri lavori minori di smantellamento sono stati portati avanti in contemporanea alla costruzione di un nuovo deposito per rifiuti già esistenti o prodotti dalle attività di dismissione, e attualmente è in costruzione un edificio per il trattamento dei fanghi ed altri liquidi. Il combustibile irraggiato non è più presente nelle piscine dagli anni ’90, quando è stato trasferito nel Regno Unito per il riprocessamento.

---

[98] Sogin S.p.a., *Centrale di Trino Vercelli*, <http://www.sogin.it/it/chi-siamo/bonifica-ambientale-degli-impianti-nucleari/dove-siamo/centrale-di-trino-vercelli.html>, dicembre 2013.

[99] Sogin S.p.a., *Centrale di Caorso Piacenza*, <http://www.sogin.it/it/chi-siamo/bonifica-ambientale-degli-impianti-nucleari/dove-siamo/centrale-di-caorso-piacenza.html>, dicembre 2013.

[100] Sogin S.p.a., *Centrale di Latina*, <http://www.sogin.it/it/chi-siamo/bonifica-ambientale-degli-impianti-nucleari/dove-siamo/centrale-di-latina-latina.html>, dicembre 2013.

I progressi nella centrale di Garigliano[101]sono invece molto limitati. A parte l'allontanamento del combustibile irraggiato verso il Regno Unito e, in parte, verso il deposito di Saluggia, cosa che ha permesso la bonifica della piscina, e la rimozione dell'amianto nell'edificio turbina e reattore, si è ancora in fase progettuale per la realizzazione di un nuovo deposito in situ per i rifiuti prodotti. Anche la strategia da attuare per lo smantellamento futuro del vessel e dei sistemi ad esso collegato, non è certa, a causa delle peculiarità di un BWR di prima generazione come questo. Si consideri solo, che il complesso del reattore è collocato in posizione rialzata rispetto al piano dell'edificio, costituendo, anche solo per questo fatto, una difficoltà maggiore ad operarvici. Questo caso particolare dà l'occasione di esporre una delle criticità nello smantellamento degli impianti più vecchi. Come si è già visto per l'amianto, gli impianti storici presentano problematiche legate alla presenza di sostanze pericolose di tipo convenzionale, che si sommano a quelle ingegneristiche di tipo strettamente nucleare. Le prime e le seconde, sono spesso difficili da affrontare, e necessitano di lunghe fasi di progettazione degli interventi da attuare, spesso minate dalla difficoltà nel reperire la documentazione originale od a richiedere il supporto dei progettisti e/o dello staff originario dell'impianto.
Le attività negli impianti italiani stanno procedendo in maniera più o meno intensa e si dovranno attendere ancora parecchi anni per vedere se gli obiettivi finali riusciranno ad essere raggiunti. La lezione che si può però già trarre dalla vicenda del decommissioning in Italia, è quella della necessità di programmare, ancora prima della realizzazione dell'impianto, le tappe che porteranno al suo completo smantellamento una volta terminata la vita operativa. Questo significa anche prevedere, fin dalla progettazione, strutture e sistemi che possano essere efficacemente costruiti e manutenuti in sicurezza, ma che diano anche opportunità di essere smantellati, possibilmente con procedure standard. A ciò si legano ovviamente le procedure di condizionamento e successivo stoccaggio in luogo idoneo e possibilmente definitivo dei rifiuti prodotti, durante la vita della centrale e durante le operazioni di dismissione. Tutto ciò permetterebbe inoltre una sicura riduzione dei costi una volta definite le linee guida da seguire per le varie operazioni, che verrebbero integrate progressivamente da best-practice acquisite con l'esperienza. Il caso italiano dimostra invece come non definire una via certa e poi intraprenderla, determini solamente il posporre del problema. Anche i precedenti, in cui il problema dei rifiuti si era decretato emergenziale, definizione invero poco plausibile, ed il successivo tentativo di risolvere questa dichiarata emergenza con un colpo di mano, imponendo dall'alto agli abitanti di una zona il farsi carico per molti decenni a seguire

[101] Sogin S.p.a., *Centrale di Garigliano Caserta*, <http://www.sogin.it/it/chi-siamo/bonifica-ambientale-degli-impianti-nucleari/dove-siamo/centrale-di-garigliano-caserta-.html>, dicembre 2013.

dell'eredità delle centrali italiane, dimostrano la scarsa visione d'insieme sul tema. Anche a livello europeo, si sottolinea come la concertazione con le popolazione locali in tema di futuri depositi nazionali di stoccaggio di sorgenti radioattive, risulti essenziale. Se ciò non viene portato avanti, il rischio è quello che si concretizzi ciò che è accaduto e ancora adesso si verifica, stoccare in tanti piccoli/medi centri i vari rifiuti, dal momento che non esiste condivisione sulla costruzione di un unico centro nazionale. La soluzione, o almeno il tentativo di trovare una soluzione definitiva all'annosa questione, non può che passare dalla trasparenza e da un sempre maggior coinvolgimento nelle decisioni dei gruppi di stakeholders. Questo dialogo dovrebbe basarsi su processi decisionali graduali e di avanzamento adattativo[102], grazie ai quali, il progetto sia concepito per fasi condivise e, nel limite del possibile, reversibile in funzione di mutate condizioni ambientali o risultati non corrispondenti a quanto pianificato. Si potrebbero inoltre prevedere confronti pubblici per la discussione degli aspetti più importanti, supportati da materiale di informazione ed approfondimento delle procedure che si andranno ad attuare, al fine di riscuotere la piena fiducia della popolazione. Inoltre, basandosi su esperienze passate, e pur considerando le peculiarità delle diverse popolazioni che abitano i diversi territori, si riscontrano preoccupazioni comuni, come quelle concernenti i rischi per la salute, o per le ricadute sull'economia dell'area[103], che potrebbero essere affrontate con efficacia se ve ne fosse la consapevolezza. Tutte queste attività informative e di collaborazione potrebbero inoltre essere supervisionate da un organo di controllo che basi il suo operato, sull'apertura, la chiarezza, la responsabilità, indipendenza e competenza.

[102] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency, *Disattivazione e Smantellamento degli Impianti Nucleari: stato dell'arte, strategie, problematiche*, Parigi, OECD, 2002, 35
[103] Ibidem, 33-35

CLASSIFICAZIONE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

Come si è già precedentemente avuto modo di affermare, non tutti i rifiuti proveniente dal decommissioning, presentano rischio radiologico. Quelli che lo costituiscono, sono caratterizzati da un'ampia gamma di caratteristiche che li distinguono gli uni dagli altri. Non esiste quindi un'unica tipologia di rifiuto radioattivo, così come non sussiste la medesima pericolosità per tutti i rifiuti. Molti necessitano di accortezze minime per la loro gestione, altre sistemi complessi di confinamento.

Data la natura anche molto diversa dei rifiuti, la classificazione di questi ultimi può basarsi su numerosi fattori. Si possono distinguere questi materiali per la loro origine: oltre al decommissioning, i rifiuti vengono prodotti anche durante la vita della centrale, ma un volume rilevante proviene anche dall'ambito medicale, e da altri settori come l'industria. Si possono classificare i rifiuti anche in base allo stato fisico, o alle proprietà e i conseguenti rischi chimici associati.

Il metodo standard nel Mondo per la classificazione risulta comunque, quello basato sulle proprietà radiologiche del rifiuto. Le proprietà radiologiche vengono individuate in base al tempo di dimezzamento dei radionuclidi contenuti nei materiali, la generazione di calore, il tipo di emissione radiologica [104]. Questi risultano i principali fattori. E' conveniente soffermarci ad esporre brevemente questi concetti per una più agevole comprensione.

Tempo di dimezzamento (emivita):

Non tutti gli elementi presenti sul pianeta, risultano stabili. Quelli che non lo sono, sono soggetti ad un processo di decadimento naturale, trasmutandosi in altri elementi a numero atomico inferiore. Questo decadimento può avvenire in tempi rapidissimi, frazioni di secondo, od impiegare miliardi di anni. Questo processo può portare un elemento a trasmutarsi in un altro, e successivamente in un altro/i ancora fino a raggiungere uno stato stabile, mantenendolo permanentemente. Questo processo comporta l'emissione di particelle, suddivise in alfa, beta e gamma. Il tempo di dimezzamento non è altro quindi che il tempo necessario per cui la metà degli atomi di un elemento, decadano in un altro elemento. Prendendo ad esempio il ^{235}U già incontrato, questo non rimarrà radioattivo indefinitamente, ma decadrà gradualmente, fino a raggiungere uno condizione di stabilità, cessando completamente di essere radiologicamente pericoloso, quando tutti i suoi atomi si saranno trasformati in ^{206}Pb. Le trasmutazioni possono anche portare a stadi intermedi in cui l'elemento decade in

[104] Alfredo Luce, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 29

un elemento radiologicamente più pericoloso, ma lo stadio finale, è sempre quello della stabilità.

Tipo di emissione radiologica:

La trasmutazione può, come detto, portare all'emissione di particelle alfa, beta ed eventualmente e successivamente, gamma, con diverse intensità di energia. Queste risultano essere forme diverse di quelle che comunemente vengono, indistintamente, definite radiazioni. Non volendo addentrarsi nelle caratteristiche fisiche di queste particelle, basti sapere che sono queste a determinare anche la pericolosità per i viventi. In linea generale, ciò che distingue, in base ai rischi per la salute, queste particelle, è la localizzazione della sorgente di emissione oltre che l'energia posseduta. Le particelle alfa infatti, pur non riuscendo a penetrare la cute umana, costituiscono un pericolo più elevato delle beta e gamma se inalate od ingerite, divenendo emettitori interni. Le particelle beta possiedono la capacità di penetrare i tessuti, ma i rischi da esse derivati possono essere pressoché azzerati dall'interposizione tra la sorgente ed il soggetto, di pochi centimetri di spessore, variabili a seconda del materiale. I raggi gamma, risultano invece la radiazione più penetrante, e necessita di schermature di spessori notevoli, generalmente piombo[105], metallo, CLS, ecc.

La generazione di calore:

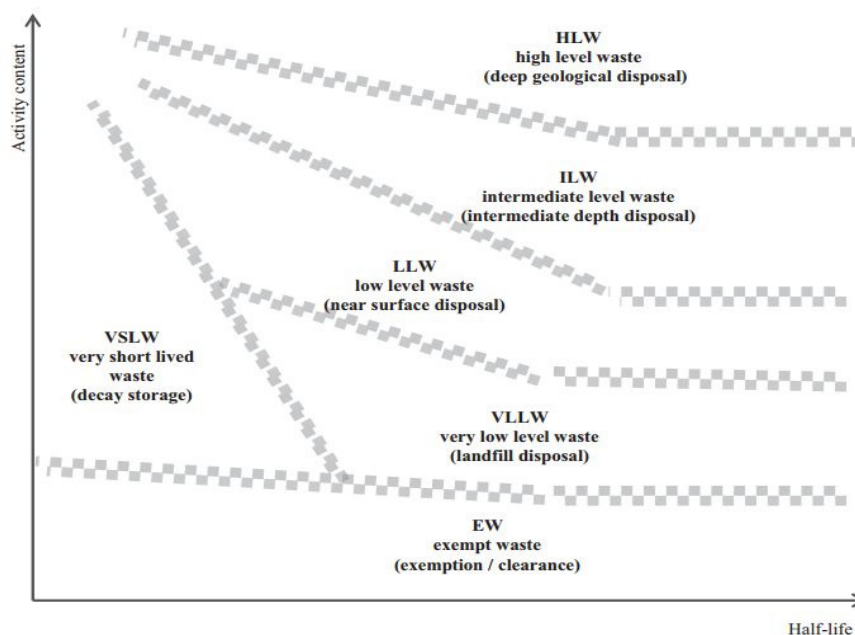
I processi di decadimento comportano anche emissione termica. L'attività degli elementi radioattivi in decadimento, comporta infatti un movimento a livello degli atomi e quindi calore. Questa proprietà e sfruttata per esempio negli RTG, *Radioisotope ThermoElectric Generators*, che utilizzano il calore prodotto dal decadimento di un elemento radioattivo per la generazione di elettricità.

Conoscere l'entità dell'emissione termica risulta a questo punto chiaro, in un ottica di stoccaggio in sicurezza del rifiuto. La non opportuna gestione di materiali con temperature elevate può portare al progressivo deterioramento dei contenitori, con conseguenti perdite, contaminazione e compromissione dei siti di stoccaggio.

Fissati questi concetti fondamentali, si può ora introdurre il tema della classificazione dei rifiuti a livello internazionale secondo gli standard della International Atomic Energy Agency. Deve essere premesso che, tenendo in considerazione quanto esposto in termini di decadimento naturale, un rifiuto inizialmente classificato ad un dato livello tra quelli seguenti, tenderà, con il tempo, a passare ad una classificazione inferiore.

---

[105] United States Environmental Protection Agency, *Gamma Rays*, < http://www.epa.gov/radiation/understand/gamma.html>, aggiornato 15 maggio 2013

GRAFICO 27. CLASSIFICAZIONE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

Fonte: International Atomic Energy Agency, *Classification of radioactive waste: General Safety Guide NO. GSG-1*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2009, 7

L'agenzia internazionale per l'energia atomica, ha individuato, sei classi in cui far rientrare i rifiuti radioattivi[106], riepilogati nel ***Grafico 27***, che si andranno ora ad esaminare:

- EXEMPT WASTE (EW): sono rifiuti contenenti solo basse concentrazioni di radionuclidi, nei limiti di quanto stabilito dalle Autorità competenti, e che non richiedono ulteriori controlli, permettendo il loro smaltimento convenzionale o il loro riciclo. Ciò vale per i rifiuti solidi, mentre per quelli gassosi e liquidi, devono sussistere controlli più stringenti in merito alla quantità scaricabile nell'ambiente.
- VERY SHORT LIVED WASTE (VSLW): rifiuti contenenti radionuclidi a brevissima emivita, ma con radioattività superiori ai limiti visti per lo smaltimento come EXEMPT WASTE. Questi rifiuti possono essere stoccati fino a che la loro attività non diminuisca ad un livello tale da poter essere poi gestiti come rifiuti convenzionali. La classificazione di VSLW deriva dalla concentrazione predominante di radionuclidi a brevissima vita ed in generale, vengono classificati in questa categoria i rifiuti contenenti elementi con emivita di circa 100 giorni o meno.
- VERY LOW LEVEL WASTE (VLLW): rientrano in questa categoria una parte consistente dei rifiuti derivanti dal decommissioning, ma anche da attività come l'estrazione mineraria. Sono rifiuti che richiedono limitati accorgimenti dal punto di vista della protezione radiologica e della sicurezza, non richiedendo quindi alti livelli di

[106] International Atomic Energy Agency, *Classification of radioactive waste: General Safety Guide NO. GSG-1*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2009, 5,6 ed 8-15

contenimento ed isolamento, presentando comunque rischi simili o superiori a quelli degli EXEMPT WASTE. I rifiuti di questa classe vengono generalmente smaltiti in discariche di superficie dedicate, che nella maggior parte dei paesi, accolgono solo materiali provenienti dal settore estrattivo, e più specificatamente terre e ghiaie con bassi livelli di attività, ma esistono esperienze anche di smaltimento di materiali con basse concentrazioni di attività provenienti da impianti nucleari. Il design del progetto, e le strutture ingegneristiche presenti nel sito, possono variare molto da caso a caso.

- LOW LEVEL WASTE (LLW): sono considerati LLW, I rifiuti che risultano idonei per lo stoccaggio con soluzioni vicino alla superficie. Ricadono quindi in questa classificazione, un ampio gruppo di rifiuti radioattivi, da quelli con concentrazioni di attività leggermente superiori a quelli dei VLLW, che non richiedono strutture di schermatura o sistemi di contenimento particolarmente complessi, come potrebbe essere il barile petrolifero rappresentato in ***Figura 12,*** a quelli che invece richiedono strutture di contenimento ed isolamento più articolate, tali da garantire il rifiuto per alcune centinaia di anni.

FIGURA 12. TIPICO CONTENUTO DI UNA BARILE PETROLIFERO CONTENENTE LLW

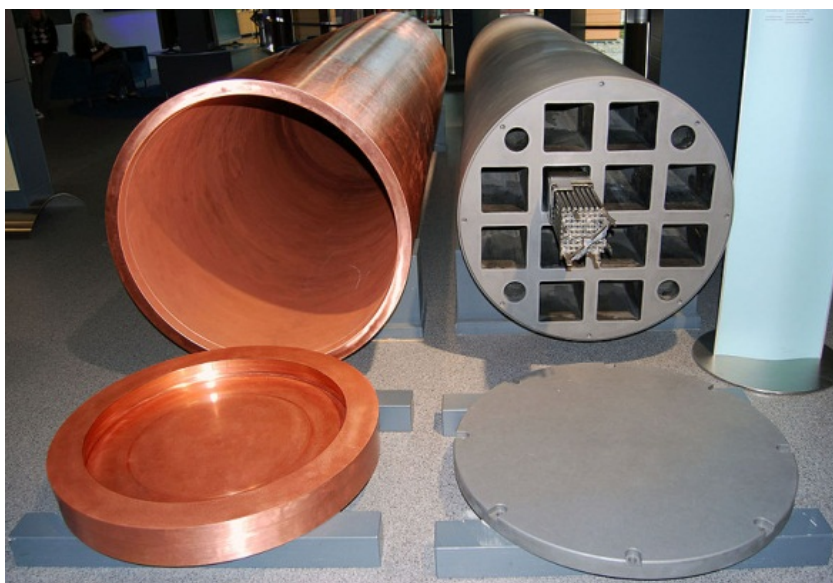
Fonte: Dounreay, *New Low Level Waste Facilities*, <http://www.dounreay.com/waste/radioactive-waste/low-level-waste/new-low-level-waste-facilities>, 2013.

A seconda dei paesi, e delle varie normative, le soluzioni utilizzate prevedono lo stoccaggio in strutture ingegneristiche, da quelle a livello del terreno, fino a profondità di circa 30 metri.

Non esiste un confine netto tra LLW e la classe superiore, date le diverse caratteristiche di attività dei singoli o gruppi di radionuclidi, da cui derivano anche i livelli accettabili della stessa attività. In linea generale, i LLW possono includere radionuclidi a breve

emivita ma con rilevanti concentrazioni di attività, ed anche radionuclidi a lungo decadimento, ma solo con concentrazioni di attività relativamente bassi.

- INTERMEDIATE LEVEL WASTE (ILW): sono rifiuti contenenti radionuclidi a lungo decadimento, che necessitano di un livello di contenimento e di isolamento dall'ambiente superiore a quello che può essere raggiunto dallo stoccaggio in superficie. Le strutture destinate a contenerli quindi, devono essere localizzati a profondità variabili, da alcune decine ad alcune centinaia di metri nel terreno. Questi accorgimenti permettono di garantire l'integrità dei contenitori per lunghi periodi di tempo, sia dagli effetti della naturale erosione da parte degli agenti atmosferici, sia da eventuali intrusioni umane, senza che ciò dipenda strettamente dal controllo di personale addetto. Questo ultimo fattore è particolarmente importante, poiché il periodo di decadimento a livelli accettabili di alcuni radionuclidi, è tale da non poter assicurare la continuità del controllo da parte delle istituzioni. L'emissione di calore non è tale da richiedere, o richiede solo in parte, la presenza di dispositivi di dissipazione.
- HIGH LEVEL WASTE (HLW): rifiuti caratterizzati da elevate concentrazioni di radionuclidi a breve e lungo decadimento, che necessitano di dispositivi di contenimento ed isolamento dall'ambiente esterno molto superiori rispetto a quelli previsti per gli ILW. La gestione di tali rifiuti dovrebbe essere effettuata in strutture geologiche, definite con il termine di *Deep Geological Repository*, a profondità rilevanti, nell'ordine delle centinaia di metri, che ne garantiscano la stabilità ed integrità per periodi di tempo molto lunghi, nell'ordine di migliaia di anni, in contenitori equivalenti a quelli di ***Figura 13.***

FIGURA 13. CONTENITORE PER STOCCAGGIO DI COMBUSTIBILE IRRAGGIATO KBS-3

Fonte: European Geosciences Union, *Geotalk: Catharina Landström on the safe storage of nuclear waste*, <http://geolog.egu.eu/2013/09/04/geotalk-catharina-landstrom-on-the-safe-storage-of-nuclear-waste/>, 4 settembre 2013.

Il calore in questo caso risulta un fattore importante, data l'emissione significativa, che si protrae, gradualmente riducendosi, anche per molti secoli.

Quelle appena presentate, sono le linee guida a livello internazionale, ma come si era visto nell'esposizione della vicenda del decommissioning in Italia, la normativa di riferimento presenta delle differenze. Il documento a cui si deve fare riferimento, risulta la "*Guida Tecnica n°26*"[107]. In questo caso, i rifiuti vengono classificati in tre categorie:

I. rifiuti per i quali la radioattività decade nell'ordine di mesi o di qualche anno, per i quali è previsto lo smaltimento come materiale convenzionale, trascorso il tempo necessario.

II. rifiuti che decadono in centinaia di anni, contenenti radionuclidi anche a lunghissima vita media, ma livelli di radioattività inferiori ad un determinato limite nel manufatto contenitore. Per questa classe di rifiuti è previsto lo stoccaggio in superficie o a bassa profondità.

III. rifiuti che decadono in migliaia di anni, contenenti radionuclidi anche a lunghissima vita media, nell'ordine di migliaia di anni, e livelli di radioattività superiore al limite della categoria II. nel manufatto contenitore. Per questi materiali, come avviene anche per la normativa internazionale, la destinazione è in formazioni geologiche a grande profondità.

Nonostante la validità di tale classificazione, e gli sforzi portati avanti per la revisione di queste linee guida, si sottolinea come un'armonizzazione, a livello internazionale[108], delle disposizioni in materia di rifiuti radioattivi, garantirebbe una semplificazione nelle procedure da attuare e un maggiore collaborazione e scambio di esperienze tra i vari paesi coinvolti in questa tematica. Ancor più, in merito alla progettazione ed alle procedure attuate sui siti di stoccaggio, questa armonizzazione risulterebbe auspicabile, date anche le attuali discrepanze, da paese a paese, nella destinazione a siti con caratteristiche diverse, per materiali con attributi, dal punto di vista radiologico, comparabili.

Come si è visto, i materiali provenienti dal decommissioning, possiedono caratteristiche anche molto diverse tra loro, sotto molteplici prospettive. Alcuni di questi, presentano rischi per la salute umana e l'ambiente, od risultano senza utilità. Molti dei così definiti rifiuti però, e qui si fa riferimento in prima battuta a quelli rientranti nella classe degli EXEMPT WASTE, possono avere una seconda vita come materiali da riciclo. Le opportunità in questo senso, appaiono chiare se si considera che un impianto nucleare è costituito da strutture di diverse dimensioni ma, che generalmente, sono costruite con cemento armato o, in alternativa,

[107] ENEA-DISP, *Guida Tecnica n°26*, in *Sicurezza e Protezione*, n°14, 1987, reperibile al momento presso: http://gsp3.casaccia.enea.it/Territorio/pp-territorio/GT26.HTM, s.d.

[108] Alfredo Luce, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 22,23

acciaio. Inoltre, una rilevante quantità dei materiali, di cui le apparecchiature ed altri sistemi, presenti in queste strutture, sono costituite, sono parimenti destinabili al processo di riciclaggio.

Per meglio inquadrare le quantità dei vari materiali presenti in un'installazione nucleare, ci si servirà di un documento dell'Oak Ridge National Laboratory statunitense[109]. Quest'ultimo, seppur datato, può restituirci interessanti informazioni, anche considerando che l'oggetto dello studio è un reattore della filiera PWR, quindi la più diffusa al mondo attualmente, e di potenza standard. A pagina 5, si può ritrovare una utile tabella riepilogativa, richiamata in ***Figura 14.***

FIGURA 14. MATERIALI DI BASE COSTITUENTI UN GENERICO IMPIANTO PWR DA 1000 MW(E), INCLUSI I MATERIALI CONSUMATI DURANTE LA COSTRUZIONE

Table 2. Quantities of basic constituent materials contained in a typical 1000-MW(e) PWR plant, including field construction materials consumed

Material	Total estimated quantity (metric tons)
Aluminum	18
Antimony	Negligible
Asbestos	138
Chromium	415
Copper	726
Iron	34,662
Lead	47
Manganese	467
Molybdenum	164
Nickel	484
Silver	<1
Tin	2
Titanium	Negligible
Zinc	2
Magnesia	783
Cement	30,133
Aggregate (coarse)	90,361
Aggregate (fine)	45,855

Fonte: R.H. Bryan, I.T. Dudley, *Estimated quantities of materials contained in a 1000-MW(e) PWR power plant: ORNL-TM-4515*, Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1974, 5

La tabella è composta in maggioranza da metalli, come alluminio, cromo e rame, ma le quantità presenti più elevate sono quelle del ferro, circa 35.000 tonnellate, seguite dal cemento, con più di 30.000 tonnellate. Ancora più elevate, risultano le quantità utilizzate per quanto riguarda gli aggregati, di varie granulometrie, circa 140.000 tonnellate, che diverranno

[109] R.H. Bryan, I.T. Dudley, Estimated quantities of materials contained in a 1000-MW(e) PWR power plant: ORNL-TM-4515, Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1974

insieme all'acciaio, il cemento armato. I materiali base, vengono quindi trasformati al fine di ottenerne altri, compositi, riepilogati in un'altra tabella, (***Figura 15).***

FIGURA 15. MATERIALI COMPOSITI COSTITUENTI UN GENERICO IMPIANTO PWR DA 1000 MW(E), INCLUSI I MATERIALI CONSUMATI DURANTE LA COSTRUZIONE

Table 1. Estimated quantities of composite materials contained in a typical 1000-MW(e) PWR power plant, including field construction materials consumed

Material	Total estimated quantity
Aluminum, metric tons	18
Babbitt metal, metric tons	<1
Brass, metric tons	10
Bronze, metric tons	25
Carbon steel, metric tons	32, 731
Concrete, yd^3	98,130
Copper, metric tons	694
Galvanized iron, metric tons	1,257
Inconel, metric tons	124
Insulation (thermal), metric tons	922
Lead, metric tons	46
Nickel, metric tons	1
Paint, gal	17,500
Silver, metric tons	<1
Stainless steel, metric tons	2,080
Wood, bd ft	4.8×10^6

Fonte: R.H. Bryan, I.T. Dudley, *Estimated quantities of materials contained in a 1000-MW(e) PWR power plant: ORNL-TM-4515*, Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1974, 4

Parte dell'acciaio può essere recuperato in fase di demolizione delle strutture, separandolo dal calcestruzzo, ma molto è anche presente sotto forma di turbine ed altre apparecchiature correlate, nonché nell'edificio del reattore, (***Figura 16).***

Il calcestruzzo proveniente dalla demolizione poi, seppur un materiale molto meno pregiato del ferro, può trovare comunque una sua utilità in campo edile, se non conferito in discarica per lo smaltimento.

La possibilità di intraprendere il processo di riciclo dei materiali provenienti da impianti nucleari, dipende dalla profittabilità di questa operazione per le imprese coinvolte direttamente od indirettamente nel decommissioning e, dal punto di vista autorizzativo, dal tasso di attività dei radionuclidi in essi contenuti. Entro una certa soglia, definita di esenzione, in inglese *exemption level*, o *clearance level*, ossia il livello entro o sotto il quale cessa il controllo da parte dell'organismo incaricato, i materiali provenienti da un impianto nucleare, possono anche essere avviati al riciclaggio.

Da quel momento verranno considerati come rottami ferrosi, maceria, ecc. Soglie di esenzione vengono anche definite per i materiali di recupero provenienti da altre attività umane.

FIGURA 16. LOCALIZZAZIONE DELLE QUANTITÀ DI ACCIAIO PIÙ RILEVANTI ALL'INTERNO DI UN IMPIANTO PWR

APPENDIX B

COMPILATION OF COMPOSITE MATERIALS OF CONSTRUCTION FOR A TYPICAL 1000-MWe PWR

ACCOUNT	SYSTEM[a]	QUANTITIES				
		ALUMINUM (METRIC TONS)	BABBITT METAL (METRIC TONS)	BRASS (METRIC TONS)	BRONZE (METRIC TONS)	CARBON STEEL (METRIC TONS)
	ENTIRE PLANT	18.14	0.42	10.10	25.14	32731.27
21	STRUCTURES AND SITE	1.19	0.0	2.93	0.21	16519.30
211	SITE IMPROVEMENTS	0.05	0.0	0.0	0.0	1692.94
212	REACTOR BUILDING	0.14	0.0	0.34	0.02	7264.23
213	TURBINE BUILDING	0.82	0.0	1.43	0.07	3641.16
214	INTAKE AND DISCHARGE	0.0	0.0	0.02	0.00	333.66
215	REACTOR AUXILIARIES	0.05	0.0	0.15	0.01	1358.73
217	FUEL STORAGE	0.06	0.0	0.10	0.00	364.60
218	MISCELLANEOUS BUILDINGS	0.08	0.0	0.88	0.10	1863.99
22	REACTOR PLANT EQUIPMENT	5.22	0.0	0.0	0.54	3444.93
221	REACTOR EQUIPMENT	0.0	0.0	0.0	0.0	429.99
222	MAIN HEAT TRANSFER SYSTE	0.0	0.0	0.0	0.04	1686.54
223	SAFEGUARDS COOLING SYSTE	0.0	0.0	0.0	0.13	274.15
224	RADWASTE SYSTEM	0.0	0.0	0.0	0.02	35.20
225	FUEL HANDLING SYSTEMS	0.0	0.0	0.0	0.01	81.98
226	OTHER REACTOR EQUIPMENT	0.0	0.0	0.0	0.35	823.53
227	INSTRUMENTATION AND CONT	5.22	0.0	0.0	0.0	113.53
23	TURBINE PLANT EQUIPMENT	1.17	0.28	6.89	21.48	10958.35
231	TURBINE-GENERATORS	0.0	0.27	0.0	19.74	4138.66
232	HEAT REJECTION SYSTEMS	0.0	0.0	0.36	0.72	2501.06
233	CONDENSING SYSTEMS	0.0	0.0	1.50	0.24	1359.80
234	FEED-HEATING SYSTEM	0.0	0.00	3.89	0.32	1367.76
235	OTHER EQUIPMENT	0.0	0.00	1.13	0.45	1541.28
236	INSTRUMENTATION AND CONT	1.17	0.0	0.0	0.0	49.80
24	ELECTRIC PLANT EQUIPMENT	4.10	0.14	0.0	2.48	965.46
241	SWITCHGEAR	0.0	0.0	0.0	0.74	30.40
242	STATION SERVICE EQUIPMEN	0.02	0.14	0.0	0.72	654.12
243	SWITCHBOARDS	4.08	0.0	0.0	0.05	86.98
244	PROTECTIVE EQUIPMENT	0.0	0.0	0.0	0.45	5.90
245	STRUCTURES AND ENCLOSURE	0.0	0.0	0.0	0.0	112.49
246	POWER AND CONTROL WIRING	0.0	0.0	0.0	0.51	75.57
25	MISCELLANEOUS EQUIPMENT	6.46	0.0	0.29	0.43	843.23
251	TRANSPORTATION AND LIFTI	0.0	0.0	0.0	0.0	529.34
252	AIR AND WATER SERVICE SY	0.0	0.0	0.29	0.0	232.56
253	COMMUNICATIONS EQUIPMENT	0.34	0.0	0.0	0.0	4.67
254	FURNISHINGS AND FIXTURES	6.12	0.0	0.0	0.43	76.66

Fonte: R.H. Bryan, I.T. Dudley*, Estimated quantities of materials contained in a 1000-MW(e) PWR power plant: ORNL-TM-4515*, Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1974, 37

La contaminazione da radionuclidi infatti, può essere sia di origine naturale, sia artificiale, e quindi non è limitata alle installazioni nucleari, ma anche per esempio, dalla generazione geotermoelettrica, in particolare da vari isotopi del radio e del radon, naturalmente presenti in natura[110], e dalle già citate attività estrattive. I prodotti di scarto di tutte queste attività vengono raggruppati sotto l'acronimo di TENORM, acronimo per *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*. Annualmente, a livello globale, il volume maggiore di TENORM deriva dagli scarti del funzionamento delle centrali a carbone, sotto forma di polveri.

Il fatto interessante da sottolineare però, è legato alla diversa considerazione dei materiali da riciclo, a seconda della loro provenienza, in base alle legislazioni dei vari paesi[111].

Si è detto precedentemente che, se un materiale sottoposto a controllo radiologico, si mantiene entro una soglia di esenzione predeterminata, può essere avviato al riciclo. La logica vorrebbe

[110] Silvia Bucci et al., *Analisi dell'impatto radiologico delle centrali geotermiche e la normativa italiana*, dal convegno dal titolo: Controllo Ambientale degli Agenti Fisici: Nuove Prospettive e Problematiche Emergenti, Vercelli, 24-27 marzo 2009, Firenze, ARPAT, 2009

[111] World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities: Constraints on recycling*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013.

che, sulla base di quanto appena affermato, materiali contenenti il/i medesimo/i radionuclide/i, nella stessa concentrazione, a prescindere dalla loro provenienza, sia essa il decommissioning di un impianto nucleare o di uno convenzionale, debbano sottostare ad un medesimo exemption level. Ciò in realtà, non sempre accade.

In Europa, solo la Norvegia e l'Olanda hanno definito exemption levels coerenti a prescindere dalla provenienza dei materiali. Nel resto del continente si registra invece l'utilizzo, da parte delle diverse Autorità, di due regolamentazioni parallele, con limiti molto più stringenti, in termini di attività dei radionuclidi contenuti, per i materiali provenienti dalla dismissione di impianti nucleari, rispetto ad altri di provenienza convenzionale. Queste discrepanze, non trovano fondamento nelle caratteristiche fisiche e radiologiche e, oltre a limitare l'opportunità di riutilizzare elementi utili, classificandoli al contrario come rifiuti, sollevano dubbi anche in termini di validità dei limiti imposti. Anche qui, la logica, porterebbe a pensare che un limite trenta volte superiore per un materiale proveniente da applicazioni non nucleari, rispetto ad uno stesso materiale proveniente da un impianto atomico, od è eccessivamente permissivo o, al contrario, se si stabilisce che il primo sia sufficiente a tutelare la salute umana e l'ambiente, si può propendere per un'eccessiva rigorosità del secondo, altresì non giustificata. Questa dicotomia, si spinge fino ad accordare limiti per la concentrazione di radionuclidi, dal decadimento lento, notevolmente superiori, perché contenuti in materiali di provenienza convenzionale, rispetto a limiti inferiori per radionuclidi dall'emivita molto più breve, derivanti da applicazioni nucleari. Un qualche fondamento di questi due pesi utilizzati, potrebbe essere ricondotto nella limitazione della quantità di materiale riciclabile per esercitare un maggior controllo, al fine di minimizzare i rischi derivanti dalla rifusione di rottame di ferro accidentalmente contenente sorgenti radioattive, come accaduto in vari casi, dei quali si può citare uno dei più recenti nell'evento dell'Acerinox di Los Barrios in Spagna, nel 1998[112]. Comunque, dal momento che un controllo è condizione necessaria per il rilascio della certificazione di EXEMPT WASTE, questi eventi non dovrebbero accadere. Inoltre la limitazione nelle quantità riciclabili, sembrerebbe una modalità poco efficace di limitare i rischi di contaminazione, dato che questi ultimi, per la stragrande maggioranza, derivano da rottami di provenienza non certificata, e a quel punto l'intervento più efficace da porre in atto, come peraltro già avviene, deve interessare le fonderie, trasferendo a queste ultime la responsabilità del controllo e del rilevamento di eventuali anomalie nell'attività radiologica dei materiali ivi conferiti.

[112] International Atomic Energy Agency, *Reducing Risks in the Scrap Metal Industry: Contamination in Spain*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2005, 5

A fronte di questi doppi standard comunque, altri paesi europei, stanno dimostrando che è possibile riciclare manufatti in metallo con radioattività anche rilevante, recuperando da essi percentuali vicine al 100% di elementi metallici liberi da vincoli radiologici, destinando allo smaltimento come Low-Level Waste il rimanente. E' quindi possibile mettere in atto determinate procedure al fine di massimizzare il recupero dei materiali e destinarli al riciclo, minimizzando i rischi radiologici, e non si comprende quindi ancora di più, le limitazioni così stringenti per materiali da considerarsi EXEMPT WASTE.

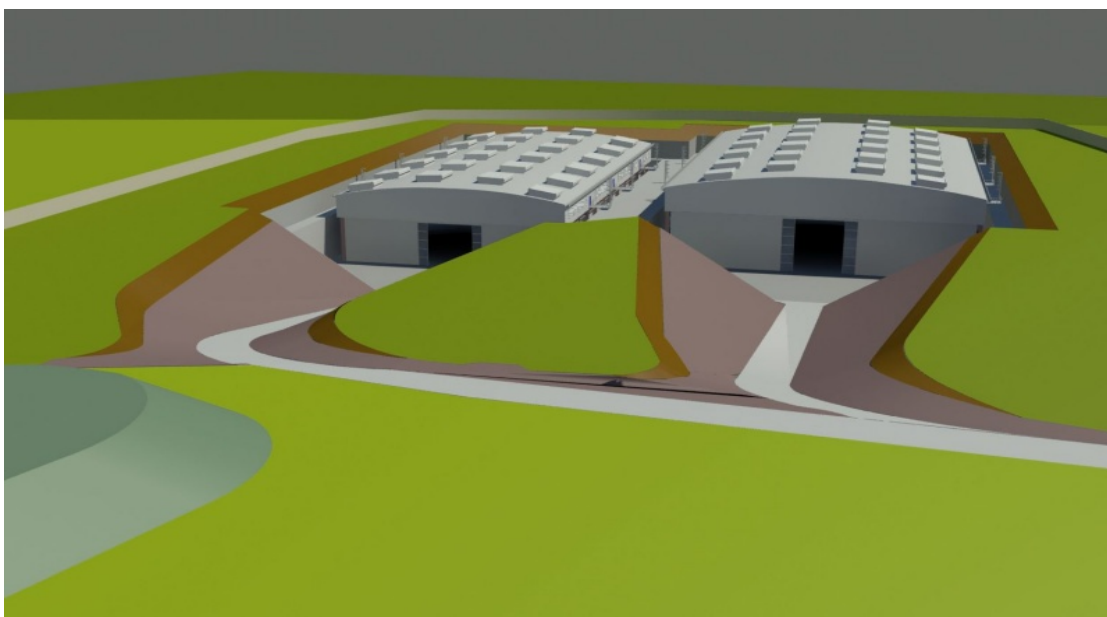
Anche in questo caso perciò, come già visto per altre fattispecie, l'auspicio è quello di riuscire ad armonizzare, a livello internazionale, i limiti, giungendo ad una loro parificazione, a prescindere dalla provenienza dei materiali, basandosi sull'assunto che la soglia individuata dagli organismi di controllo, è l'unico fattore rilevante ai fini della destinazione al riciclo o, se i materiali superano questa soglia, allo smaltimento con modalità diverse a seconda della classificazione. Una maggior concertazione tra i paesi poi, sarebbe consigliabile al fine di stabilire delle linee guida chiare in termini di estensione e tempistiche di effettuazione dei monitoraggi dei rottami ferrosi alla ricerca di anomalie radiologiche. Questo coordinamento, dovrebbe confluire in accordi condivisi a livello governativo, ma anche a stimolare iniziative a livello di industria privata[113]. Dal versante delle diverse autorità governative, queste ultime dovrebbero approntare direttive ed approcci uniformemente riconosciuti per il controllo delle sorgenti radioattive presenti sul territorio del paese, oppure importate od esportate attraverso i confini nazionali, da parte di figure professionali con adeguate competenze a svolgere questi compiti; in seconda battuta, per la vigilanza e regolamentazione delle attività che potrebbero prestarsi a rischi di contaminazione, cercando quanto più possibile di prevenire questi eventi, inoltre prevedendo procedure chiare e condivise per gestire le situazioni in cui, eventualmente, questa contaminazione venisse rilevata, in un'ottica di mitigazione delle possibili conseguenze dell'evento.

Dal lato dell'industria, dovrebbe invece essere incentivata l'introduzione di vincoli contrattuali volontari o, in alternativa, prevederli per legge, al fine di responsabilizzare sia il venditore che il compratore di rottami ferrosi o altri materiali, a richiedere il rispetto dei limiti radiologici per quanto scambiato. Anche l'incaricato al trasporto dei materiali risulterebbe una figura chiave nel processo, procedendo al controllo in prima persona, attraverso personale con un'appropriata preparazione specifica, oppure facendosi rilasciare apposita certificazione da parte del venditore.

[113] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), *Reccomendations on Monitoring and Response procedures for Radioactive Scrap Metal*, New Yok and Ginevra, UNECE, 2006, 13-15

SMALTIMENTO DEI RIFIUTI CONTENENTI RADIONUCLIDI

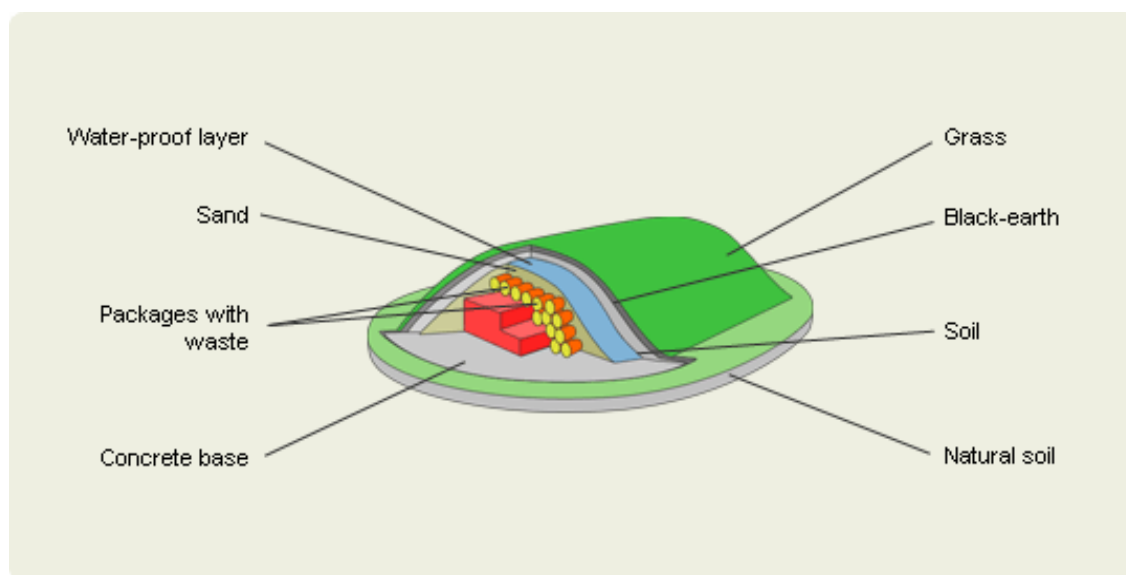
In linea generale, la scelta di stoccaggio o smaltimento dei rifiuti deve essere decisa sulla base del tempo di decadimento di questi ultimi, oltre che sulla valutazione degli altri rischi radiologici per la salute e l'ambiente, nonché su quelli di proliferazione di armamenti atomici. Il tempo di decadimento risulta un fattore importante poiché da esso dipenderà anche la progettazione delle strutture di contenimento e la loro successiva costruzione, che dovrà assicurare l'integrità dei rifiuti per un periodo sufficientemente lungo affinché questi ultimi cessino di rappresentare un rischio, o che comunque permetta una riduzione della loro attività, per essere trattati attraverso altri processi o destinati ad altro sito di immagazzinamento.
Generalmente, per le VLLW ed LLW, vengono utilizzate soluzioni che prevedono lo stoccaggio in superficie attraverso la costruzione di strutture, che consentano di proteggere i contenitori dei rifiuti dagli agenti atmosferici e da possibili intrusioni non autorizzate[114], (***Figura 17).***

FIGURA 17. SOLUZIONE "NEAR-SURFACE" PER LO SMALTIMENTO DI LLW

Fonte: Dounreay, *New Low Level Waste Facilities*, <http://www.dounreay.com/waste/radioactive-waste/low-level-waste/new-low-level-waste-facilities>, 2013.

Questa modalità può prevedere anche la copertura dell'area, una volta raggiunta la capienza prevista, tramite interramento, sotto spessori nell'ordine di qualche metro, (***Figura 18).***

[114] World Nuclear Association, *Storage and disposal options: Radioactive waste Management Appendix 2*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Appendices/Radioactive-Waste-Management-Appendix-2--Storage-and-Disposal-Options/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Questo approccio risulta il più utilizzato, vedendo applicazione nel Regno Unito, Spagna, Francia, Giappone e Stati Uniti. Per la medesima classe di rifiuti, ed anche per ILW a breve emivita, altri paesi, come Svezia e Finlandia, hanno optato per lo stoccaggio vicino-superficie, collocandoli in tunnel precedentemente scavati, a profondità nell'ordine delle decine di metri[115]. Queste pratiche, sono state portate avanti e perfezionate nel corso di parecchi decenni ormai, costituendo una soluzione consolidata, anche nel lungo periodo, a livello globale.

FIGURA 18. SOLUZIONE "NEAR-SURFACE" PER LO SMALTIMENTO DI VLLW

Fonte: Visaginas Nuclear Power Plant project, *Management and final disposal of very-low-level radioactive waste*, http://www.vae.lt/en/pages/very_low_level_radioactive_waste, 2013.

Le criticità più rilevanti riguardano invece parzialmente le ILW, ma soprattutto le HLW.
Nel corso del tempo, si è proposto un ampio ventaglio di soluzioni, più o meno realizzabili ma, in particolare per le HLW, l'unica destinazione praticabile attualmente è quello dello stoccaggio temporaneo in appositi contenitori in grado di minimizzare il rilascio di radioattività verso l'ambiente esterno. Il termine "temporaneo" potrebbe trarre in inganno, infatti inizialmente si pensava che questo stoccaggio sarebbe stato tale, dal momento che si sarebbero rese disponibili soluzioni definitive per lo smaltimento in breve tempo. Inoltre va tenuto in considerazione il quadro genereale che caratterizzava gli anni del boom dell'industria nucleare, soprattutto nei decenni degli anni '50 e '60, quando si riteneva che smaltire, in particolare le LLW, con pratiche simili ai rifiuti convenizonali, fosse una soluzione praticabile e sufficiente in termini di sicurezza. Una soluzione molto praticata

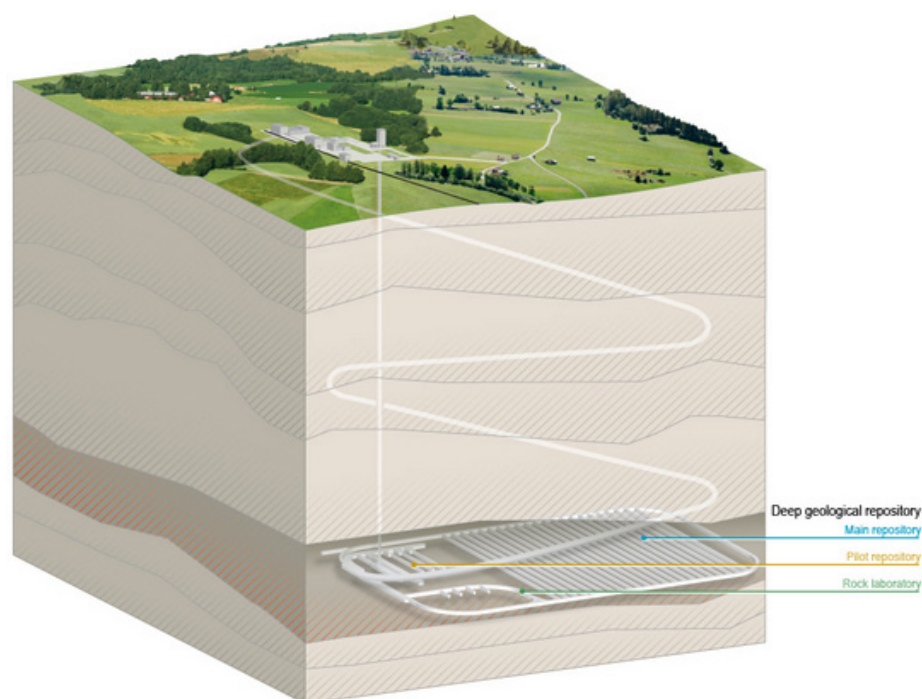
[115] World Nuclear Association, *Storage and disposal options: Radioactive waste Management Appendix 2*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Appendices/Radioactive-Waste-Management-Appendix-2--Storage-and-Disposal-Options/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

all'epoca, era semplicemente lo scavare fossi profondi qualche metro che successivamente venivano riepiti di materiali debolmente contaminati e successivamente ricoperti, senza prevedere nemmeno un qualche dispositivo per isolarli dal terreno e di conseguenza dalle falde acquifere, come appare nell'immagine di ***Figura 19.***

FIGURA 19. SMALTIMENTO DI RIFIUTI RADIOATTIVI TRAMITE INTERRAMENTO (IDAHO, 1958)

Fonte: Susan M. Stacy, *Proving the Principle*, Idaho Falls, Idaho Operations Office of the Department of Energy, 2000, 82

Allo stato attuale, questa temporaneità probabilmente necessiterà di essere prorogata ulteriormente, fintanto che non entreranno in operazione centri di stoccaggio geologici, strutture ingegneristiche che si compongono da tunnel sotterranei, a profondità che variano dai 250 ai 1000 metri, (***Figura 20).***

FIGURA 20. RAPPRESENTAZIONE CONCETTUALE DI UN DEEP GEOLOGICAL REPOSITORY

Fonte: Swiss Federal NuclearSafety Inspectorate (E.N.S.I.), *Deep geological repositories*, <http://www.ensi.ch/en/waste-disposal/deep-geological-repository/>, aggiornato 2013.

Lo smaltimento in profondità, in strati stabili della crosta terrestre, dovrebbe garantire l'integrità dei rifiuti presenti nei contenitori, per periodi di tempo molto lunghi, nell'ordine di millenni o decine di millenni. Questa soluzione è ormai quella che viene considerata definitiva, potendo, in teoria, garantire la sicurezza dell'ambiente e della salute delle future generazioni, senza la necessità di garantire la vigilanza del sito come avviene oggi per le soluzioni a livello di superficie. Questo fattore risulta essenziale, alla luce di considerazioni storiche in merito alla fattibilità della preservazione di un sito in superficie, per periodi anche brevi, e marginali in termini di decadimento degli HLW.
Si pensino ai rischi legati a possibili conflitti armati futuri, al collasso delle istituzioni del paese che ospita i rifiuti che favorirebbe l'intrusione e la sottrazione di materiali pericolosi, o anche al semplice oblio da parte della popolazione sul contenuto dei depositi, che potrebbe portare quest'ultima ad esserne esposta accidentalmente. Queste possibilità fanno sorgere interrogativi, che esulano dalle mere considerazioni scientifiche, calcoli e previsioni.

I deep geological repository sono strutture che dovrebbero garantire l'inviolabilità per centinaia di generazioni dopo la loro chiusura, ma nulla, se ci basiamo sulla storia, potrà assicurare che effettivamente i nostri discendenti decideranno di starne alla larga; nel caso delle piramidi per esempio, si è assistito ad una progressiva razzia, da parte di archeologi e

ladri, per nulla impauriti dalle storie di maledizioni che su di esse aleggiavano. Forse quindi proprio l'oblio, precedentemente citato come un rischio, potrebbe essere il fattore da coltivare, permettendo di preservare le future generazioni dai dai pericoli della radioattività dormiente in questi profondi depositi. Ricordarsi di dimenticare[116] potrebbe essere quindi la strategia più efficace. Da un'altra prospettiva, la possibilità che le scorie stoccate, possano in un futuro essere recuperate da una civiltà più evoluta della attuale, con nuove tecnologie e conoscenze, potrebbe rivelarsi un tesoro sotto forma di una fonte di energia dal valore inestimabile.

Il progetto di deposito attualmente più promettente sembra quello finlandese di Onkalo, in cui i lavori sono iniziati nel 2004, e per cui è previsto il primo conferimento per il 2020, dopo il raggiungimento di una profondità di circa 450 metri.

Anche altri paesi stanno conducendo progetti sperimentali per la futura costruzione di repository di questo genere, portando avanti diversi approcci, soprattutto dal punto di vista del tipo di caratteristiche geologiche della roccia che ospiterà i rifiuti. Il punto fondamentale che fa propendere per i deep geologial repository si basa infatti sull'assunto che gli strati profondi del sottosuolo sono rimasti immutati per milioni di anni e probabilmente lo rimarrano per altre migliaia o milioni, indipendentemente dalle condizioni che si vericheranno in superficie. Sussistono tuttavia dei rischi anche a tali profondità che necessitano di studi approfonditi per la loro limitazione, sia in fase progettuale, sia in fase di costruzione, momento nel quale potrebbero anche rendersi necessari correttivi a quanto preliminarmente definito. Questi rischi sono rappresentati essenzialmente dalle infiltrazioni di acqua dalle faglie profonde, che potrebbe andare, una volta penetrata nell'area del deposito, ad intaccare l'integrità dei contenitori, con aumento del rischio di contaminazione o andarlo ad allagare, rendendo inservibile. In passato, anche se questi particolari siti erano destinati ricevere fortunatamente solo, se così si può dire, LLW e ILW, vi sono stati problemi proprio in seguito ad infiltrazione dalle falde sotterranee che hanno anche determinato un deterioramento dell'assetto strutturale dei depositi, costringendo alla loro chiusura. I due casi più eclatanti, sono quelli delle ex miniere di sale tedesche di Asse e di Morsleben[117], (***Figura 21).***

[116] Michael Madsen, *Into Eternity*, Documentario, Danimarca, 75', 2009
[117] Bundesamt fur Strahlenschutz, *Morsleben repository at a glance*, <http://www.bfs.de/en/endlager/endlager_morsleben/morsleben_einstieg/morsleben_ueberblick.html>, s.d. [2012?]

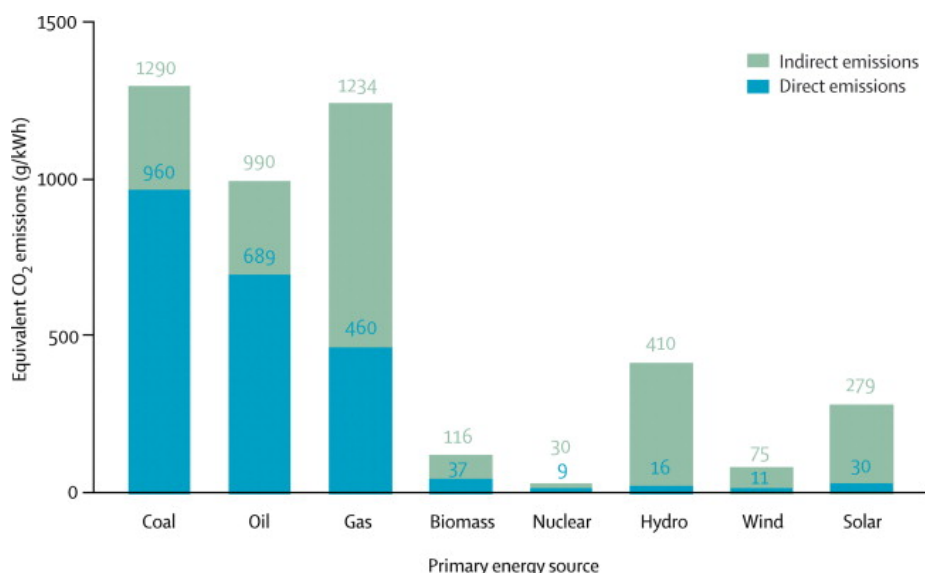
FIGURA 21. DEPOSITO RIFIUTI RADIOATTIVI DI MORSLEBEN, GERMANIA (E.R.A.M.)

Fonte: Tages Woche, *Schwarzpeter-Spiel mit gezinkten Karten*, <http://www.tageswoche.ch/+bdxyq>, 27 marzo 2013.

CONCLUSIONI

In un’ottica generale, la generazione elettrica, a prescindere dalla fonte considerata, comporta sia benefici che costi per le popolazioni delle varie nazioni. In prima battuta, questi benefici e costi vanno ad incidere sulla salute e, più in generale, sulle condizioni di vita degli individui. I benefici cagionati dalla transizione dall’utilizzo di combustibili, che si possono definire non commerciali, considerando con questo termine in particolare la legna e suoi derivati, a quelli commerciali, in particolare se questi vengono utilizzati per la produzione di elettricità, sono evidenti se si prende in considerazione il progresso, economico e sociale, che si è registrato nelle nazioni sviluppate, in particolare nell’ultimo secolo. Questo stesso fenomeno, seppur con gradulità e con differenze, anche marcate, da una realtà ad un’altra, e da una zona ad un’altra del globo, si può altresì riscontrare nei paesi definiti in via di sviluppo. Si può quindi dire che gli sforzi tesi a sostituire in maniera sempre più spinta le fonti energetiche più inquinanti con altre forme che lo sono meno, è una delle chiavi per il miglioramento delle condizioni di vita. Per avere un esempio dell’affermazione appena esposta, si pensi a come la diffusione dell’energia elettrica abbia reso possibili attività fino a quel momento difficilmente realizzabili, soprattutto per fascie sociali definibili popolari. L’elettricità e il suo sviluppo, ha permesso alle persone di illuminare le proprie case, in modo sicuro e più efficacemente di quanto fosse possibile fino a quel momento, di poter lavare in casa i propri indumenti, informarsi attraverso nuovi media, prima con la radio e successivamente con la televisione, poter conservare i cibi, e sempre più aprire la strada all’emergere di nuovi strumenti elettrici ed elettronici domestici. Questo sviluppo è ancora oggi in corso ed una prova ne è la costante proliferazione di dispositivi sempre nuovi che alimentano un giro di affari in continuo aumento. In sintesi, l’economia odierna è, per una parte consistente, basata e dipendente dall’energia elettrica. Come si è inizialmente anticipato, per godere di tali benefici, si devono pagare dei costi. La già citata transizione dai combustibili non commerciali a quelli attualmente maggiormente impiegati, in particolare petrolio e carbone, è coincisa con uno spostamento da un inquinamento interno, nelle case, di chi, per illuminare, riscaldarsi, cucinare, ricorreva alla combustione di legna ed altri materiali, ad uno esterno. Quest’ultimo è dato dall’inquinamento atmosferico ed dalle criticità legate all’emissione di gas serra. Se quindi, in particolare considerando i paesi sviluppati, si è assistito a minori impatti diretti sulla salute a seguito del progressivo abbandono della combustione domestica, si deve tenere in considerazione che anche la generazione elettrica ne comporta altri, anche se la loro natura è più sfuggente in termini di ricadute indirette. In queste ricadute indirette rientrano non solo gli impatti derivanti dalla generazione in sé, ma anche quelli legati alle altre fasi del processo, come quella dell’estrazione del combustibile, il suo trasporto, la gestione dei rifiuti che

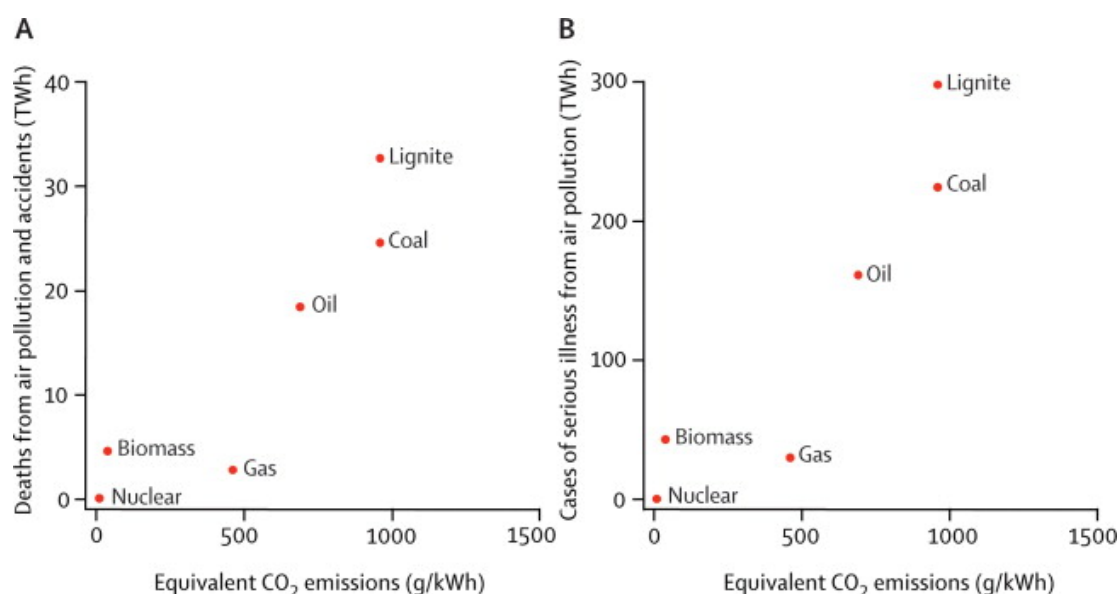
vengono prodotti e della consegna dell'elettricità. Un dato quantitativo utile per fornire una visione di quanto le varie fonti usate per la generazione elettrica, impattino sull'ambiente e sugli esseri viventi, può essere quello offerto dal seguente grafico, che esprime il contributo, in termini di grammi di CO_2, per ogni kilowattora prodotto:

CONTRIBUTO ALL'EMISSIONE DI CO2 PER FONTE ENERGETICA

Fonte: The Lancet, *Full energy chain CO2 equivalent emissions by primary energy source*, <http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140673607612537/images?imageId=gr2§ionType=green&hasDownloadImagesLink=true>, 2001

Come si può notare, esistono differenziali notevoli in termini di emissioni di biossido di carbonio, a seconda della fonte energetica utilizzata. Quello di cui subito ci si rende conto è come il carbone comporti emissioni molto rilevanti, mentre quelle legate al nucleare sono inferiori anche a quelle delle fonti rinnovabili.

Alla luce di quanto appena visto, la sfida che attende i paesi sviluppati nei prossimi decenni, parallelamente ad una diffusione sempre più capillare delle fonti rinnovabili, sarà quella di sfruttare in modo sempre più efficiente le fonti fossili convenzionali. Margini di miglioramento in questo senso sussistono, e ciò non potrà che determinare miglioramenti sia da un punto di vista economico che da quello della riduzione degli inquinanti nocivi per la salute. Questa prospettiva di un futuro caratterizzato ancora dallo sfruttamento delle fonti fossili, ma orientato ad una graduale e meditata transizione verso nuove fonti energetiche rinnovabili, potrà mettere al riparo i paesi dai rischi che potrebbero emergere se si intraprendesse una corsa alla rinnovabili che, almeno al momento, pare complessa, soprattutto in relazione al carattere di intermittenza che caratterizza la produzione rinnovabile. Appare comunque chiaro come il tema dell'aumento dell'efficienza nello sfruttamento delle fonti

fossili risulti meno sentito nei paesi in via di sviluppo, dove la crescita economica spinge più a costruire rapidamente nuovi impianti di generazione, che a curarsi di aumentare la produttività di quelli già esistenti. Nonostante ciò, il tema dell'efficienza diverrà via via più importante anche in questi paesi, tenendo in considerazione i ritmi a cui la domanda elettrica vi cresce di anno in anno.
Avendo citato le ricadute in termini di salute, può risultare interessante avere un quadro generale del ruolo, in termini di numero di morti e malattie gravi, come cancro, problemi vascolari, ecc. ascrivibile alle emissioni derivanti diverse fonti utilizzate per la generazione di energia elettrica:

RELAZIONE TRA DECESSI E MALATTIE GRAVI, ED EMISSIONI

Fonte: The Lancet, *Health effects of electricity generation per TWh*, < http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140673607612537/images?imageId=gr3§ionType=green&hasDownloadImagesLink=true>, 2001

Gli effetti negativi sulla salute derivanti dalla combustione di carboni e, in misura minore dal petrolio, sono certamente subito evidenti, mentre, anche in questo caso il nucleare si dimostra la fonte meno impattante. Una ovvia obiezione che certamente può nascere, è quella secondo cui, se il nucleare è così povero in termini di emissioni di CO_2, le morti o comunque altre ricadute importanti sulla salute umana difficilmente risulteranno dal suo contributo all'inquinamento atmosferico. Per offrire una maggiore chiarezza su questo punto quindi, si fornirà un'ulteriore tabella:

EFFETTI SULLA SALUTE DERIVANTI DALLA GENERAZIONE ELETTRICA PER LE DIVERSI FONTI, IN EUROPA, PER TWH PRODOTTO

	Deaths from accidents		Air pollution-related effects		
	Among the public	Occupational	Deaths*	Serious illness†	Minor illness‡
Lignite[30]	0·02 (0·005–0·08)	0·10 (0·025–0·4)	32·6 (8·2–130)	298 (74·6–1193)	17 676 (4419–70 704)
Coal[26]	0·02 (0·005–0·08)	0·10 (0·025–0·4)	24·5 (6·1–98·0)	225 (56·2–899)	13 288 (3322–53 150)
Gas[31]	0·02 (0·005–0·08)	0·001 (0·0003–0·004)	2·8 (0·70–11·2)	30 (7·48–120)	703 (176–2813)
Oil[28]	0·03 (0·008–0·12)	..	18·4 (4·6–73·6)	161 (40·4–645·6)	9551 (2388–38 204)
Biomass[31]	..	..	4·63 (1·16–18·5)	43 (10·8–172·6)	2276 (569–9104)
Nuclear[16,32]	0·003	0·019	0·052	0·22	..

Fonte: The Lancet, *Health effects of electricity generation in Europe by primary energy source (deaths/cases per TWh)h,* < http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140673607612537/table?tableid=tbl2&tableidtype=table_id§ionType=green>, 2001

Si premette subito che, per quanto riguarda il nucleare: la colonna riferita alle morti riporta i decessi riconducibili al cancro; quella delle malattie gravi fa riferimento alle situazioni in cui il cancro non ha avuto effetti fatali, oltre a comprendere le patologie ereditarie. I dati mostrano chiaramente come sia i decessi determinati da incidenti che quelli legati a patologie sviluppate, risutano decine volte molto più contenuti rispetto a quelli riconducibili anche alle forme più sicure di generazione convenzionale.

Basandosi sui dati visti quindi, appare come il nucleare potrebbe offrire un rilevante sostengno alla necessità, sempre più stringente, di ridurre le emissioni di gas serra in atmosfera. Le poche, ma efficaci opzioni che si presentano ai governi per perseguire questo obiettivo, per limitare il contributo a questo problema generato dalla produzione elettrica da fonti fossili, che contribuisce per ben un terzo alle emissioni mondiali di gas serra, si può quindi sintetizzare in quattro punti. Alcuni di questi sono già stati esposti precedentemente, e sono: l'aumento dell'efficienza del ciclo di produzione dell'energia elettrica e l'espansione dell'impiego delle fonti rinnovabili. Gli altri due contributi possono pervenire: dalla cattura e sequestro della CO_2, strumento di particolare rilevanza se esso viene utilizzato presso gli impianti a carbone ed infine, dall'incremento nell'uso dell'energia nucleare.

Per quanto riguarda i paesi in via di sviluppo, come Cina ed India, sembra che la spinta forte ad uno sviluppo delle proprie industrie nucleari sia considerato fondamentale, e ciò è dettato, oltre che da considerazioni ambientali, anche sulla fiducia riposta nella generazione nucleotermoelettrica, considerata come una via per affrancarsi dalla dipendenza dalle importazioni energetiche straniere, ma anche per incentivare lo sviluppo di tutto l'indotto derivante dalla costruzione e gestione di un impianto nucleare, oltre ovviamente agli aspetti legati allo ricerca scientifica ed ingegneristica nel campo.

Nei principali paesi industrializzati al contrario, con particolare riferimento agli Stati Uniti, il tasso di crescita della produzione elettrica da nucleare si è via via ridotto, per poi annullarsi

negli ultimi dieci anni. Anche se segnali concreti di una ripresa nella costruzione di nuova capacità nucleare anche nei paesi sviluppati vi sono stati, e continuano ad esservi, le criticità che limitano una possibile “Rinascita Nucleare”, sono riconducibili a quattro punti focali:

- Costi. L’intera vita di un impianto nucleare comporta costi superiori a quello di impianti convenzionali come quelli a gas o carbone. E’ necessario tuttavia premettere che questa considerazione è influenzata da aspetti di regolazione e tassazione dei combustibili convenzionali attualmente vigenti, che prevedibilmente verranno rivisti dai vari governi alla luce delle richieste sempre più pressanti di riduzione delle emissioni in atmosfera. Ulteriore levitazione dei costi è ascrivibile altresì all’ iter per l’approvazione di nuovi impianti, generalmente lungo e dettagliato, che va a sommarsi a quello necessario ai decisori politici.
- Sicurezza. Con differenze molto marcate da paese a paese, la percezione dell’opionione pubblica in termini di sicurezza, sostenibilità ambientale ed impatti sulla salute, presenta criticità.
- Proliferazione. Seppur notevoli passi avanti sono stati compiuti in questo senso, il rischio che il materiale utilizzato per gli impianti civili possa essere utilizzato come precursore per armi atomiche, è molto sentito, soprattutto alla luce dell’acquisizione di capacità di arricchimento e riprocessamento da parte di stati considerati ostili all’Occidente.
- Scorie. Il punto più controverso rimane comunque quello legato alla gestione nel lungo periodo dei rifiuti radiologici prodotti. Un forte ostacolo allo sviluppo del nucleare è stato originato proprio dalla mancanza dell’implementazione pratica di soluzioni atte allo smatimento realmente definitvo delle scorie.

Si può affermare che se i diversi governi decideranno di destinare risorse, e favorire l’espansione del nucleare, dipenderà molto da quanto quest’ultimo sarà in grado contribuire a porre un freno al cambiamento climatico e agli altri effetti avversi generati dalle emissioni di gas serra in atmosfera. Il rapporto tra costi e benefici sarà altresì influenzato dall’andamento futuro nell’installazione di nuova capacità di generazione elettrica convenzionale. Con questa affermazione si vuole evidenziare come il nucleare sia legato a doppio filo in particolare con carbone e gas. E’ evidente che se la tendenza nei prossimi anni sarà a generare elettricità sempre più da carbone ed altre fonti inquinanti, questo non farà che aumentare la considerazione generale circa i benefici che un incremento di capacità nucleare potrà determinare, mitigando sempre più la percezione avversa e le voci contrarie ad esso.

La sfida nell'enucleare i quattro punti focali precedentemente individuati dovrà a quel punto passare da decisioni riguardanti la tecnologia utilizzata nel processo di generazione elettronucleare, considerazioni economiche, ma anche il saper rispondere alle istanze sociali in merito alle sicurezza degli impianti e dei materiali coinvolti, oltre a definire linee guida per una corretta gestione delle scorie.
Più nel dettaglio, il primo dei diversi temi che si dovranno approfondire, riguarda le scelte relative al ciclo del combustibile. Queste scelte riguardano il tipo di combustibile utilizzato, la filiera in cui quest'ultimo verrà impiegato nonché il destino delle scorie prodotte nel processo, se esse verranno cioè condotte al riprocessamento o se al contrario, si opterà per un loro diretto smaltimento. Il perseguimento del ciclo chiuso permetterebbe di estendere la durata dello sfruttamento delle riserve di uranio nonché una riduzione del volume di rifiuti destinati allo smaltimento, tuttavia il ciclo aperto presenta vantaggi in termini di costi, riduzione dei rischi di proliferazione, e sicurezza del processo ed è ormai preferito da importanti produttori come Stati Uniti e Germania.
La decisione di far rientrare nell'analisi portata avanti in questo testo, in merito all'atteggiamento del pubblico verso l'energia nucleare è stata determinata dalla considerazione che l'espansione della capacità installata richiede il consenso di questo pubblico. Il nucleare potrà garantirsi questo consenso solo se i governi saranno i grado di veicolare ai cittadini informazioni complete e rilevanti, creando e diffondendo conoscenza in merito alla generazione elettronucleare che prevalga sulle paure, principalmente determinate da una non ben chiara e completa visione d'insieme del tema. Utile alla causa, sarebbe altresì sottolineare il collegamento che intercorre tra i rischi del riscaldamento climatico e la necessità di ridurre il ricorso a fonti di energia fossili convenzionali in favore di altre fonti più pulite. A fianco di iniziative che possiamo definire di comunicazione, miglioramenti tecnologici che permettano di incrementare la sicurezza e ridurre i costi rivestono anch'essi un ruolo determinante nella costruzione del consenso, anche se sono chiaramenti più onerosi da perseguire e richiedono periodo di tempo più lunghi per essere implementati.
Uno dei fattori principali che andrà ad incidere sulla portata dello sviluppo del nucleare nel mondo, rimane comunque quello economico. In particolare fondamentale sarà quanto i costi associati alla costruzione, gestione, e decommissioning riusciranno a ridursi ed a diventare sempre più concorrenziali nei confronti delle altre modalità convenzionali di generazione elettrica. La riduzione dei costi fa leva essenzialmente sulla capacità di ridurre gli oneri in termini di capitali necessari alla costruzione, ma anche su quella di essere in grado di velocizzare i tempi di messa in operatività degli impianti. Una previsione sull'evoluzione futura è complessa anche perché sussistono elementi di incertezza, da un lato sul fronte

tecnologico, non sapendo in quale misura le innovazioni tecniche ed ingegneristiche contribuiranno alla riduzione dei costi, ma anche sul fronte del mercato. Il nucleare potrebbe divenire più competitivo, anche entro un periodo relativamente veloce, su altre forme di generazione se, per esempio, i costi sociali delle emissioni di CO_2 venissero "internalizzati". Si fa riferimento con questo termine alla situazione che si verrebbe a creare a seguito dell'introduzione, da parte dei governi, di forme di imposizione fiscale, definibili con un termini generico come "*carbon-tax*". Simili forme di imposizione creerebbero un contesto molto più favorevole per gli investitori desiderosi di puntare sulla generazione basata sull'atomo.

In conclusione, la questione cardine comunque, che dovrà necessariamente essere affrontata per garantire un futuro al nucleare, rimane la gestione delle scorie. Nonostante si sia cercato, e lo si stia facendo da decenni, nessun paese è ancora riuscito a realizzare un sistema integrato che garantisca uno smaltimento definitivo dei rifiuti radiologici. L'unica concordanza tra gli esperti, è che la collocazione definitiva migliore dei rifiuti più pericolosi è rappresentata dai depositi geologici. Come si è però visto dall'analisi, si stanno incontrando rilevanti problematiche nella messa in funzione di simili strutture, e non solo dal punto di vista ingegneristico. Un grande sforzo è infatti richiesto anche ai decisori politici ed alle autorità di controllo, chiamati ad affrontare scelte importanti in termini di finanziamento delle opere, ma anche di mediazione con le popolazioni interessate.

La scelta della strategia di gestione comporta in alcuni casi anche un conflitto tra interessi, e i diversi obiettivi, che si intendono perseguire. Se, per esempio, si concretizzasse uno scenario in cui il numero delle installazioni nucleari nel mondo registrasse un notevole incremento, emergerebbe una crescente necessità di depositi in cui stoccare le scorie prodotte, sempre che si escludesse l'emergere di innovazioni tecnologiche in grado di cambiare le carte in tavola. Dato il costo necessario per la realizzazione di questi ultimi, vi sarebbe una crescente spinta verso il reprocessing, al fine di ridurre il volume dei rifiuti massimizzando la capacità dei siti, la loro generazione di calore, nonché il periodo di tempo in cui essi dovranno essere isolati in sicurezza dall'ambiente circostante. Nonostante questi benefici, il riprocessamento farebbe però emergere una serie di problematiche in termini di rischi di proliferazione, rischi molto più limitati al contrario, se si preferisse per il ciclo aperto, che però non permetterebbe di sfruttare i punti di forza dell'altra modalità.

A prescindere da queste considerazioni sulle tecniche e tecnologie da impiegare, vale in ogni caso l'auspicio che i diversi paesi che fanno ricorso all'energia nucleare, si uniformino attorno ad un modello dominante per quanto riguarda gli aspetti di classificazione e della regolazione della gestione delle scorie. Come si è visto nel testo, un modello valido sarebbe già

disponibile e consolidato, grazie agli sforzi dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica.

BIBILIOGRAFIA FINALE

Adams, Susan, *Where the jobs are: nuclear plant work*, Forbes, <http://www.forbes.com/2010/02/12/nuclear-power-jobs-leadership-careers-employment.html>, 12 febbraio 2010, ultima consultazione 02/01/2014

Atomic Archive, *Nuclear Fission: Basics*, <http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission1.shtml>, s.d. [2013?], ultima consultazione 02/01/2014

Azimi, Nassrine, *When nature is not enough*, The New York Times, <http://www.nytimes.com/2013/05/08/opinion/global/Japans-Shift-From-Nuclear-Energy.html?pagewanted=all>, 7 maggio 2013, ultima consultazione 02/01/2014

BBC England, *New nuclear power plant at Hinkley Point C is approved*, <http://www.bbc.co.uk/news/uk-21839684>, 20 marzo 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Bryan, R.H. and Dudley, I.T., *Estimated quantities of materials contained in a 1000-MW(e) PWR power plant: ORNL-TM-4515*, Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1974

Bucci, Silvia et al., *Analisi dell'impatto radiologico delle centrali geotermiche e la normativa italiana*, dal convegno dal titolo: Controllo Ambientale degli Agenti Fisici: Nuove Prospettive e Problematiche Emergenti, Vercelli, 24-27 marzo 2009, Firenze, ARPAT, 2009

Bundesamt fur Strahlenschutz, *Morsleben repository at a glance*, <http://www.bfs.de/en/endlager/endlager_morsleben/morsleben_einstieg/morsleben_ueberblick.html>, s.d. [2012?], ultima consultazione 01/03/2014

Bundesnetzagentur, *Press Release: Bundesnetzagentur publishes report on the situation in the electricity grid in winter 2011/2012*, comunicato stampa del 7 maggio 2012, Bonn, Bundesnetzagentur, 2012

Bundesnetzagentur, *Update of Bundesnetzagentur report on the impact of nuclear power moratorium on the trasmission networks and security of supply*, testo della conferenza stampa del 27 maggio 2011, Bonn, Bundesnetzagentur, 2011

Burger, Bruno, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 3

Burger, Bruno, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 5

Burger, Bruno, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 8

Burger, Bruno, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 9

Burger, Bruno, *Electricity production from solar and wind in Germany in 2012*, Friburgo, Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE, 2012, 43

Byrne, John and Hoffman, Steven M., *Governing the Atom: the Politics of Risk*, New Jersey, Transaction Publishers, 1995, 136

Canadian Nuclear Association, *Canada's nuclear industry: An Overview*, Ottawa, Canadian Nuclear Association, 2012, 11

Cecchi, Giulia et al., *Il sistema energetico dell'India e le sue prospettive*, Report per Master in Management dell'Energia e dell'Ambiente 2011 - 2012, Università degli Studi Roma Tre, Facoltà di Economia, a. acc. 2011-2012, 42

Cho, Meeyoung, *South Korea should lower reliance on nuclear: study*, Reuters, <http://www.reuters.com/article/2013/10/13/us-energy-korea-nuclear-idUSBRE99C00Z20131013>, 12 ottobre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Cho, Meeyoung, *South Korea to expand nuclear energy despite growing safety fears*, Reuters, <http://www.reuters.com/article/2013/01/08/nuclear-korea-idUSL4N0AD1CB20130108>, 7 gennaio 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Electricité De France, *The growth of civil nuclear in France*, <http://about-us.edf.com/profile/history/1974-1989-43673.html>, 2013, ultima consultazione 02/01/2014

ENEA-DISP, *Guida Tecnica n°26*, in *Sicurezza e Protezione*, n°14, 1987, reperibile al momento presso: http://gsp3.casaccia.enea.it/Territorio/pp-territorio/GT26.HTM, s.d., ultima consultazione 02/01/2014

Energy Fair, *LEGAL BID TO HALT NUCLEAR CONSTRUCTION: Lawyers send complaint to European Commission about subsidies for nuclear power*, <http://www.energyfair.org.uk/news-releases/legal-bid>, 2011, ultima consultazione 01/03/2014

European Commission, *Socio-Economic role of Nuclear Energy to Growth and Jobs in the EU for time horizon 2020-2050*, Working Paper of the European Commission, 2012, 1

European Commission, Socio-Economic role of Nuclear Energy to Growth and Jobs in the EU for time horizon 2020-2050, Working Paper of the European Commission, 2012, 9

European Commission, *Socio-Economic role of Nuclear Energy to Growth and Jobs in the EU for time horizon 2020-2050*, Working Paper of the European Commission, 2012, 10

Fackler, Martin, *Japan new leader takes on old order to jolt economy*, The New York Times, <http://www.nytimes.com/2013/03/07/world/asia/shinzo-abe-shakes-up-japan-in-effort-to-stir-its-economy.html?pagewanted=all&_r=0>, 6 marzo 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Globescan Inc., *Opposition to nuclear energy grows: global poll*, Press Release BBC, 2011, 8

Globescan, *Opposition to nuclear energy grows: global poll*, <http://www.globescan.com/news-and-analysis/press-releases/press-releases-2011/94-press-releases-2011/127-opposition-to-nuclear-energy-grows-global-poll.html>, 25 novembre 2011, ultima consultazione 02/01/2014

Grayso, James, *Control rods in nuclear reactors*, <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/grayson1/>, 17 febbraio 2011, ultima consultazione 02/01/2014

Guerrini, Bruno e Paci, Sandro, *Appunti di impianti nucleari, parte 2A: filiere*, Dispensa di corso, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, a. acc. 1998-1999, 19

Guerrini, Bruno e Paci, Sandro, *Appunti di impianti nucleari, parte 2A: filiere*, Dispensa di corso, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, a. acc. 1998-1999, 59

Guerrini, Bruno e Paci, Sandro, *Appunti di impianti nucleari, parte 2A: filiere*, Dispensa di corso, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, a. acc. 1998-1999, 60

Harvey, Dave, *What price nuclear power? The final hurdle for Hinkley*, BBC, <http://www.bbc.co.uk/news/uk-england-somerset-21774652>, 19 marzo 2013, ultima consultazione 02/01/2014

How Stuff Works, *What's a uranium centrifuge?*, <http://science.howstuffworks.com/uranium-centrifuge.htm>, s.d. [2013?], ultima consultazione 01/03/2014.

How Stuff Works, *How Nuclear Bombs Work*, <http://science.howstuffworks.com/nuclear-bomb3.htm>, s.d. [2013?], ultima consultazione 01/03/2014

Innovative Research Group Inc., *National Nuclear Attitude Survey*, Toronto,Canadian Nuclear Association, 2012, 3-4

International Atomic Energy Agency, *Classification of radioactive waste: General Safety Guide NO. GSG-1*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2009, 5,6 ed 8-15

International Atomic Energy Agency, *International Nuclear Safety Experts Conclude IAEA Peer Review of China's Regulatory System*, IAEA, http://iaea.org/newscenter/pressreleases/2010/prn201010.html, 30 luglio 2010, ultima consultazione 02/01/2014

International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 12

International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 13

International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 16

International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 74

International Atomic Energy Agency, *Nuclear Power Reactors in the World: 2013 Edition*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2013, 76

International Atomic Energy Agency, *Reducing Risks in the Scrap Metal Industry: Contamination in Spain*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2005, 5

International Energy Agency, *Canada: Electricity and Heat for 2011*, <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=CANADA&product=electricityandheat&year=2011>, s.d. [2012?], ultima consultazione 02/01/2014

Ipsos Mori, *Global citizen reaction to the Fukushima nuclear plant disaster*, http://www.ipsos-mori.com/Assets/Docs/Polls/ipsos-global-advisor-nuclear-power-june-2011.pdf, giugno 2011, ultima consultazione 02/01/2014

Jiyoon, Kim, Friedhoff, Karl, Chungku, Kang, *The fallout: South Korea public opinion following North Korea's third nuclear test*, Seoul, The Asan Institute for policy studies, 2013, 8

Katz, Alan, *French support for nuclear power rises ahead of law*, poll shows, Bloomberg, <http://www.bloomberg.com/news/2013-06-22/french-support-for-nuclear-power-rises-ahead-of-law-poll-shows.html>, 22 giugno 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Klapac, Rosemary, *Two Roads Diverge, and France Took the One Less Traveled: The divergence of nuclear policy in France and the United States*, Research Paper, University of Maryland, 2010, 7

Kwon, K.J, *Under threat, South Koreans mull nuclear weapons*, CNN, <http://edition.cnn.com/2013/03/18/world/asia/south-korea-nuclear/>, 19 marzo 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Loewe, Mike, *Nuclear plants will create 30000 jobs*, DispatchOnline, <http://www.dispatch.co.za/news/nuclear-plants-will-create-30-000-jobs/>, 10 giugno 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Luce, Alfredo, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 19

Luce, Alfredo, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 22,23

Luce, Alfredo, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 23-26

Luce, Alfredo, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 28

Luce, Alfredo, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Italia, ENEA/Ministero dello Sviluppo Economico, 2009, 29

MacLeod, Calum, *Protesters win environmental battle in China*, Usa Today, <http://www.usatoday.com/story/news/world/2013/07/15/china-evironment-protest/2518221/>, 16 luglio 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Madsen, Michael, *Into Eternity*, Documentario, Danimarca, 75', 2009

Massachusetts Institute of Technology, *A future for nuclear energy: pebble bed reactors*, <http://web.mit.edu/pebble-bed/papers1_files/Future%20for%20Nuclear%20Energy.pdf>, 2005

Mckellogg, Julieann, *US nuclear reinassance further crippled by Japan crisis*, Voice of America, <http://www.voanews.com/content/us-nuclear-renaissance-further-crippled-by-japan-crisis-118272249/169632.html>, 17 marzo 2011, ultima consultazione 02/01/2014

Muller, Richard A., *Nuclear Reactors, the China Syndrome, and Waste Storage*, <http://muller.lbl.gov/teaching/physics10/old%20physics%2010/chapters%20(old)/8-ChinaSyndrome.html>, 2001, ultima consultazione 01/03/2014

Nadal, Christian, *History of Nuclear Energy in France*, <http://alsosconceptmap.wlu.edu/nuclearpower/main/LinkedDocuments/2007-06-22-HISTORY%20OF%20NUCLEAR%20ENERGY-EDFINA.ppt>, 22 giugno 2007, ultima consultazione 02/01/2014

National Wetlands Research Center U.S.G.S., *Mineral Reserves, Resources, Resource potential and certainity*, http://www.nwrc.usgs.gov/techrpt/sta13.pdf, s.d., ultima consultazione 02/01/2014

Newport, Frank, *Americans still favor nuclear power a year after Fukushima: Majority also still sees nuclear power as safe*, Gallup, <http://www.gallup.com/poll/153452/americans-favor-nuclear-power-year-fukushima.aspx>, 26 marzo 2012, ultima consultazione 02/01/2014

Nucci, Giuseppe, *La bonifica ambientale dei siti nucleari*, presentazione all'interno del Workshop AIN, 8 novembre 2012, Roma, Associazione Italiana Nucleare, 2012, 3

Nuclear Energy Institute, *Fact Sheets: Nuclear Energy Facilities Contribute Significantly to State and Local Economies*, <http://www.nei.org/Master-Document-Folder/Backgrounders/Fact-Sheets/Nuclear-Power-Plants-Contribute-Significantly-to-S>, settembre 2010, ultima consultazione 02/01/2014

Nuclear Threat Initiative, *Nuclear: Ukraine*, <http://www.nti.org/country-profiles/ukraine/nuclear/>, aggiornato febbraio 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Obe, Mitsuru, *Japan posts trade deficit for record 15th month*, The Wall Street Journal, <http://blogs.wsj.com/economics/2013/10/21/japan-posts-trade-deficit-for-record-15th-month/>, 21 ottobre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Office For Nuclear Regulation, *Taking GDA work forward in the light of the unprecedented events in Japan*,<http://www.hse.gov.uk/newreactors/gda-japan.htm>, settembre 2011, ultima consultazione 02/01/2014

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency, *Decommissioning Nuclear Power Plants - policies, strategies and costs*, Parigi, OECD, 2003, 59-62

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency, *Disattivazione e Smantellamento degli Impianti Nucleari: stato dell'arte, strategie, problematiche*, Parigi, OECD, 2002, 35

Palfreman, Jon, *Why French like nuclear energy*, PBS, <http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/readings/french.html>, s.d., ultima consultazione 02/01/2014

Park, Ju-Min, *South Korea charges 100 with corruption over nuclear scandal*, Reuters, <http://www.reuters.com/article/2013/10/10/us-korea-nuclear-idUSBRE99905O20131010>, 10 ottobre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Poortinga, Wouter et al., *Public attitudes to nuclear power and climate change in Britain two years after the Fukushima accident*, Cardiff, Working Paper of the UK Energy Research Centre, 2013, 15-23

Redazione Arparivista, *Il decommissioning in Italia e nel mondo*, in *ArpaRivista*, n°5, 2009, 16

Réseau de transport d'électricité, *Annual Import/Export balance: Contractual cross-border exchanges in 2007*, <http://clients.rte-france.com/lang/an/visiteurs/vie/bilan_annu.jsp>, 2007, ultima consultazione 02/01/2014

Rubino, Manfredi, DeVita, Marco, Angioni, Michele, *La situazione energetica in Cina*, Report per Master in Management dell'Energia e dell'Ambiente 2012 - XI° Edizione, Università degli Studi Roma Tre, Facoltà di Economia, 2012, 29

Secrétariat Gèneràl du dèbat national sur la transition ènergètique, *Synthèse nationale des dèbats territoriaux*, <http://www.transition-energetique.gouv.fr/sites/default/files/dnte_synthese_nationale_des_debats_territoriaux.pdf>, settembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Slack, Megan, *Everything You Need to Know: President Obama's Blueprint for American-Made Energy*, <http://www.whitehouse.gov/blog/2012/01/26/everything-you-need-know-president-obamas-blueprint-american-made-energy>, 26 gennaio 2012, ultima consultazione 02/01/2014

Sogin S.p.a., *Centrale di Caorso Piacenza*, <http://www.sogin.it/it/chi-siamo/bonifica-ambientale-degli-impianti-nucleari/dove-siamo/centrale-di-caorso-piacenza.html>, dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Sogin S.p.a., *Centrale di Garigliano Caserta*, <http://www.sogin.it/it/chi-siamo/bonifica-ambientale-degli-impianti-nucleari/dove-siamo/centrale-di-garigliano-caserta-.html>, dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Sogin S.p.a., *Centrale di Latina*, <http://www.sogin.it/it/chi-siamo/bonifica-ambientale-degli-impianti-nucleari/dove-siamo/centrale-di-latina-latina.html>, dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Sogin S.p.a., *Centrale di Trino Vercelli*, <http://www.sogin.it/it/chi-siamo/bonifica-ambientale-degli-impianti-nucleari/dove-siamo/centrale-di-trino-vercelli.html>, dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Sogin S.p.a., Company Profile, Roma, Relazioni Esterne Sogin, 2012, 5,7,8,11

Stacy, Susan M., *Proving the Principle*, Idaho Falls, Idaho Operations Office of the Department of Energy, 2000, 260

The Economist, *Don't look now: A series of mishaps comes at an awkward time for the government*, The Economist, <http://www.economist.com/news/asia/21576450-series-mishaps-comes-awkward-time-government-dont-look-now>, 20 aprile 2013, ultima consultazione 02/01/2014

The Economist, *Nuclear Power: The 30-ear itch*, The Economist, <http://www.economist.com/node/21547803>, 18 febbraio 2012, ultima consultazione 02/01/2014

The World Bank, *Cost of pollution in China: Economic estimates of physical damages*, Pechino, The World Bank, 2007, 74

The World Bank, *Cost of pollution in China: Economic estimates of physical damages*, Pechino, The World Bank, 2007, 124

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), *Reccomendations on Monitoring and Response procedures for Radioactive Scrap Metal*, New Yok and Ginevra, UNECE, 2006, 13-15

United States Energy information Administration, *What is the Role of Coal in the United States*, <http://www.eia.gov/energy_in_brief/article/role_coal_us.cfm>, aggiornato 16 agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

United States Energy information Administration, *What is the status of the US nuclear industry*, <http://www.eia.gov/energy_in_brief/article/nuclear_industry.cfm>, aggiornato 14 dicembre 2012, ultima consultazione 02/01/2014

United States Environmental Protection Agency, *Gamma Rays*, <http://www.epa.gov/radiation/understand/gamma.html>, aggiornato 15 maggio 2013, ultima consultazione 01/03/2014

United States National Regulatory Commission, *Frequently Asked Questions About License Applications for New Nuclear Power Reactors*, Office of New Reactors, 2009, 10

United States Nuclear Regulatory Commission, *Fact Sheet on Nuclear Insurance and Disaster Relief Funds*, < http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/funds-fs.html> giugno 2011, ultima consultazione 01/03/2014

World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, Decommissioning Nuclear Facilities: Cost and Finance, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities: Constraints on recycling*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities: Decommissioning Options*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities: Decommissioning Experience*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Decommissioning Nuclear Facilities: Reasons for shutdown*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Decommissioning-Nuclear-Facilities/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in China*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in China: Reactor Technology*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in China: Regulation and safety – general*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in China: SCRO report on nuclear investment and safety*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear power in France: Recent energy policy,* <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/France/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear power in France: Recent energy policy*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/France/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in Germany: Electricity from new coal-fired plants*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Germany/>, aggiornato novembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear power in India: BACKGROUND TO NUCLEAR PROLIFERATION ISSUES*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association*, Nuclear power in India: Indian nuclear power industry development*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear power in India: Non-proliferation, US-India agreement and Nuclear Suppliers' Group*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear power in India: Thorium fuel cycle development in India*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in Russia: Life extension, uprates and completing construction* e *Building new nuclear capacity*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/Russia--Nuclear-Power/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in South Korea: Development of nuclear program & policy*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in South Korea: Fuel cycle*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in South Korea: Reactor development*, intellectual property, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>, aggiornato dicembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in Ukraine*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/Ukraine/>, aggiornato novembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in Ukraine: Increasing nuclear power capacity*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/Ukraine/>, aggiornato novembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Nuclear Power in Ukraine: Nuclear industry structure and the Russian connection*, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/Ukraine/>, aggiornato novembre 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear Association, *Storage and disposal options: Radioactive waste Management Appendix 2*, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Appendices/Radioactive-Waste-Management-Appendix-2--Storage-and-Disposal-Options/>, aggiornato agosto 2013, ultima consultazione 02/01/2014

World Nuclear News, *Chinese HTGR fuel plant under construction*, <http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Chinese_HTGR_fuel_plant_under_construction-2103134.html>, 21 marzo 2013, ultima consultazione 02/01/2014

Worldwide News Ukraine, *Opinion Poll of European Citizen on Prospect of Nuclear Energy*, <http://wnu-ukraine.com/news/?id=231>, 5 aprile 2011, ultima consultazione 02/01/2014